

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики

Направление подготовки «управление в технических системах»

Кафедра автоматики и компьютерных систем

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Анализ динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами</b>

УДК 681.516.75

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Юэ Цюцзе		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АИКС ИК	С.А. Гайворонский	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	В. Ю. Конотопский	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ ИНК	Ю. В. Анищенко	К.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АИКС ИК	А. С. Фадеев	К.Т.Н.		

Томск – 2016 г.

## Планируемые результаты обучения по направлению 27.04.04

### «Управление в технических системах»

	Результаты
P1	Применять глубокие естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами.
P2	Уметь обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с разработкой технических систем управления с использованием аналитических методов и сложных моделей.
P4	Выполнять инновационные инженерные проекты по разработке программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения с использованием современных методов проектирования, систем автоматизированного проектирования, передового опыта разработки конкурентно способных изделий.
P5	Планировать и проводить теоретические и экспериментальные исследования в области проектирования аппаратных и программных средств автоматизированных систем с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта. Критически оценивать полученные данные и делать выводы.
P6	Осуществлять авторское сопровождение процессов проектирования, внедрения и эксплуатации программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения.
P7	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий партнеров
P8	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, активно владеть иностранным языком, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена и руководителя группы, в том числе междисциплинарной и международной, при решении инновационных инженерных задач.
P10	Демонстрировать личную ответственность и ответственность за работу возглавляемого коллектива, приверженность и готовность следовать профессиональной этике и нормам ведения инновационной инженерной деятельности. Демонстрировать глубокие знания правовых, социальных, экологических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности.
P11	Демонстрировать способность к самостоятельному обучению, непрерывному самосовершенствованию в инженерной деятельности, способность к педагогической деятельности.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики

Направление подготовки (специальность) «Управление в технических системах»

Кафедра автоматизации и компьютерных систем

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8AM41	Юэ Цюцзе

Тема работы:

Анализ динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 701/с от 04.02.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:

1 июня 2016 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b> (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>	<p><i>Параметры системы автоматического регулирования скорости двигателя</i>  <math>K_{y1} = 5</math>  <math>K_{y2} = 5</math>  <math>T_1 = 0,059</math>  <math>T_2 = 0,109</math>  <math>T_{дс} = 0,012</math>  <math>K_{тп} = 2</math>  <math>T_{тп} = 0</math>  <math>K_{д1} = [2; 3]</math>  <math>K_{д2} = 2,8</math>  <math>T_э = 0</math>  <math>T_м = [0,05; 0,08]</math>  <math>K_п = 0,25</math>  <math>K_{дс} = 0,4</math>  <math>K_1 = 2,5</math></p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p><i>Построение принципиальной, функциональной и структурной схем САР</i>  <i>Получение передаточной функции замкнутой САР по управлению и ее характеристического уравнения</i>  <i>Применение теоремы для отображения многогранника интервальных параметров на плоскость корней</i>  <i>Построение многопараметрического интервального коневого годографа и анализ корневых показателей качества САР</i>  <i>Исследование САР с переменными параметрами с помощью теории чувствительности на основе коэффициентных показателей качества</i>  <i>Построение переходных процессов САР в вершинах многогранника интервальных параметров</i>  <i>Анализ переходных процессов САР при изменении ее параметров</i></p>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<p><i>Математическая модель САР скорости двигателя с интервальными параметрами</i>  <i>Анализ быстродействия и колебательности САР скорости двигателя с интервальными параметрами</i>  <i>Анализ чувствительности коэффициентных показателей качества к интервальным параметрам САР скорости двигателя</i>  <i>Моделирование САР скорости двигателя с интервальными параметрами</i>  <i>Заключение</i></p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	В. Ю. Конотопский
Социальная ответственность	Ю. В. Анищенко
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p><i>Математическая модель САР скорости двигателя с интервальными параметрами</i>  <i>Анализ быстродействия и колебательности САР скорости двигателя с интервальными параметрами</i>  <i>Анализ чувствительности коэффициентных показателей качества к интервальным параметрам САР скорости двигателя</i>  <i>Моделирование САР скорости двигателя с интервальными параметрами</i>  <i>Заключение</i></p>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	24.10.2015
--	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АИКС ИК	С.А. Гайворонский	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Юэ Цюцзе		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики

Направление подготовки (специальность) «Управление в технических системах»

Уровень образования магистратура

Кафедра Автоматики и компьютерных систем

Период выполнения осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.02.16	Получение математическая модель САР скорости двигателя с интервальными параметрами	
15.03.16	Проведение анализа быстродействия и колебательности САР скорости двигателя с интервальными параметрами	
01.04.16	Проведение анализ чувствительности коэффициентных показателей качества к интервальным параметрам САР скорости двигателя	
15.04.16	Моделирование САР скорости двигателя с интервальными параметрами	
04.05.16	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
12.05.16	Социальная ответственность	
16.05.16	Выводы по результатам работы	
23.05.16	Оформление графического материала	
30.05.16	Оформление расчётно – пояснительной записки	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АИКС ИК	С.А. Гайворонский	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АИКС ИК	А. С. Фадеев	К.Т.Н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8AM41	Юэ Цюцзе

<b>Институт</b>	<b>Кибернетики</b>	<b>Кафедра</b>	<b>АИКС</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НТИ</i>
2. <i>Сегментирование рынка</i>
3. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
4. <i>Диаграмма FAST</i>
5. <i>Матрица SWOT</i>
6. <i>График проведения и бюджет НТИ</i>
7. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>
8. <i>Потенциальные риски</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент каф. менедж. ИСГТ	В. Ю. Конотопский	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8AM41	Юэ Цюцзе		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8AM41	Юэ Цюцзе

Институт	Кибернетики	Кафедра	АИКС
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<u>Характеристика объекта исследования:</u> Анализ динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами <u>Области применения:</u> Система автоматизации
--	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	– Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения: - недостаточная освещенность; - повышенный уровень шума; - повышенный уровень электромагнитного и электрического излучения. – Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения: - электрический ток.
<b>2. Экологическая безопасность:</b>	– анализ воздействия разработки на литосферу.
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> –	Наиболее типичная ЧС – пожар.
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	– правовые нормы трудового законодательства; – нормы времени работы и отдыха с использованием ПК; – конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов;

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ ИНК	Ю. В. Анищенко	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Юэ Цюцзе		

## Реферат

Выпускная квалифицированная работа содержит 59 страниц текста, 24 рисунков, 19 таблиц, 1 приложения, 33 литературных источников.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, степень устойчивости, степень колебательности, интервальные параметры, корневой годограф, чувствительность системы.

Объектом исследования является САР скорости двигателя с интервально-неопределенными параметрами.

Цель работы – анализ влияния изменяющихся в заданных пределах параметров двигателя на качество работы САР.

В процессе выполнения работы использовался математический аппарат интервального анализа, теория устойчивости и теория чувствительности линейных систем управления.

Область применения: проектирование систем автоматического управления, объекты которых содержат интервально-неопределенные или изменяющиеся в известных пределах параметры.

Разработана математическая модель САР в форме структурной схемы, получена ее передаточная функция и характеристическое уравнение. Проведен анализ быстродействия и колебательности САР с интервальными параметрами. Для этого на основе реберной теоремы выполнено отображение многогранника интервальных параметров САР на плоскость корней и по нему проведен анализ корневых показателей качества САР.

Проведен анализ чувствительности САР к интервальным параметрам на основе коэффициентных показателей устойчивости и колебательности скорости двигателя. Для подтверждения результатов анализа выполнено компьютерное моделирование САР.

В пятой главе выполнено задание по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение». В шестой главе выполнено задание по разделу «Социальная ответственность».



## **ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

САР – система автоматического регулирования

ССУ – сравнивающее - суммирующее устройство

АКЦ – активная корректирующая цепь

ТП – тиристорный преобразователь

ДПТ – двигатель постоянного тока

ДС – датчик скорости

НР – научный руководитель

И – инженер

НДС – налог на добавленную стоимость

НИР – научная исследовательская работа

ЭМИ и ЭСИ – электромагнитное и электрическое излучение

ЭМП и ЭСП – электромагнитное и электрическое поле

ПК – персональный компьютер

КЕО – коэффициент естественного освещения

ЛБ и ЛХБ – люминесцентная лампа белого свечения или холодного  
белого свечения

МГЛ – металлогалогенная лампа

ДРЛ – ртутная лампа высокого давления

## **Нормативные ссылки**

В настоящей работе использованы нормативные ссылки на следующие документы

1. ГОСТ 12.1.003-76. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.
2. ГОСТ 12.1. 030 – 81. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
3. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
4. ФЗ "Об охране окружающей среды" от 10.01.2002 N 7-ФЗ.
5. ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.99 М 96-ФЗ.

## Оглавление

Введение .....	13
1 Математическая модель САР скорости двигателя с интервальными параметрами .....	15
1.1 Принципиальная схема САР .....	15
1.2 Функциональная и структурная схемы САР .....	18
1.3 Передаточная функция замкнутой САР по управлению .....	20
1.4 Характеристическое уравнение САР .....	21
2 Анализ быстродействия и колебательности САР скорости двигателя с интервальными параметрами .....	22
2.1 Отображение многогранника интервальных параметров САР на плоскость корней на основе реберной теоремы .....	22
2.2 Построение многопараметрического интервального корневого годографа .....	23
2.3 Анализ корневых показателей качества САР .....	25
3 Анализ чувствительности коэффициентных показателей качества САР к интервальным параметрам системы .....	29
3.1 Исследование систем с переменными параметрами с помощью теории чувствительности .....	29
3.2 Коэффициентные показатели качества САР .....	30
3.3 Чувствительность показателей качества САР к изменению параметров системы .....	31
4 Моделирование САР скорости двигателя с интервальными параметрами	36
4.1 Переходные процессы САР в вершинах многогранника интервальными параметрами .....	36
4.2 Анализ переходных процессов САР при изменении $T_m$ .....	38
4.3 Анализ переходных процессов САР при изменении $K_{d1}$ .....	38
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	40
5.1 Организация и планирование работ .....	40
5.1.1 Продолжительность этапов работ .....	42
5.1.2 Расчет накопления готовности работ .....	46
5.2 Расчет сметы затрат на создание макета КУ .....	49
5.2.1 Расчет затрат на материалы .....	49

5.2.2	Расчет основной заработной платы .....	50
5.2.3	Расчет отчислений от заработной платы .....	51
5.2.4	Расчет затрат на электроэнергию.....	51
5.2.5	Расчет амортизационных расходов.....	52
5.2.6	Расчет прочих расходов.....	53
5.2.7	Расчет общей себестоимости разработки .....	53
5.2.8	Прибыль.....	54
5.2.9	НДС .....	54
5.3	Оценка экономической эффективности проекта.....	55
5.3.1	Оценка научно-технического уровня НИР .....	55
6	Социальная ответственность .....	60
6.1	Производственная безопасность .....	60
6.1.1	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследования.....	60
6.1.2	Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	64
6.2	Экологическая безопасность .....	65
6.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	66
6.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. ..	67
	Заключение.....	70
	Приложение А .....	75

## Введение

Большинство разработанных к настоящему времени методов анализа качества функционирования систем автоматического регулирования (САР) предназначено для систем, объекты регулирования которых имеют постоянные параметры. Однако в реальных САР объекты регулирования имеют параметры, изменяющиеся в широких диапазонах. Распространение на такие САР методов анализа, разработанных и предназначенных для стационарных систем, связано с большими ограничениями, касающимися прежде всего темпа изменения параметров. При этом опыт показывает, что создание эффективных методов анализа возможно лишь тогда, когда при их разработке максимально учитываются особенности объекта регулирования.

Очевидно, что подходы, применяемые для анализа качества САР с нестабильными параметрами, эффективны только тогда, когда позволяют без трудоемкой вычислительной работы оценивать динамику САР при всех возможных значениях параметров объекта регулирования. Для этой цели наилучшим образом подходят коэффициентные методы, когда качество анализируемой САР оценивается по коэффициентам передаточной функции САР без построения переходного процесса.

При исследовании САР необходимо учитывать показатели качества, характеризующие ее динамику. Оценивать динамические свойства можно по различным показателям качества:[9]

- частотные, определяемые формой амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик САР;
- временные, определяемые формой временных процессов САР (типом переходного процесса или весовой функции);
- корневые, определяемые расположением нулей и полюсов передаточной функции САР,
- коэффициентные, определяемые набором коэффициентов передаточной функции САР.

В частотной области качество можно оценивать по запасам устойчивости (по амплитуде и по фазе), частоте среза, значению резонансного пика амплитудно-частотной характеристики САР.

Во временной области для оценки качества находят время переходного процесса, перерегулирование, число колебаний переходного процесса САР.

В корневой области качество работы САР определяется степенью устойчивости и колебательностью, которые находятся по корням характеристического уравнения САР.

На основе коэффициентов передаточной функции замкнутой САР можно определить коэффициенты ошибок, проверить устойчивость САР с помощью алгебраических критериев устойчивости.

Наименьшее число показателей качества САР находится в коэффициентной группе. При этом коэффициенты передаточной функции линейной системы непосредственно связаны с физическими параметрами системы и поэтому некоторые комбинации коэффициентов желательно иметь в качестве показателей качества САР. Этот факт служит одной из причин возможного интереса к разработке коэффициентных методов для оценки устойчивости и качества САР.

Если имеются численно заданные параметры САР (коэффициенты усиления, постоянные времени и т.п.), то имеется возможность получить любой из показателей качества рассмотренных выше групп. Действительно, непосредственно по параметрам можно построить частотные характеристики одноконтурной системы, а вычислив коэффициенты ее передаточной функции, получить совокупность нулей и полюсов системы, временные и частотные характеристики для многоконтурных систем и т.п.

# 1 Математическая модель САР скорости двигателя с интервальными параметрами

## 1.1 Принципиальная схема САР

В САР используется принцип регулирования по отклонению, который заключается в регулировании выходной величины системы в зависимости от ее отклонения от заданного входного напряжения в результате действия возмущающего фактора.

Разрывая главную обратную связь, настраиваем параметры задающего устройства и добиваемся нужной частоты при номинальной нагрузке.

Если нагрузка изменится от своего номинального значения, то выходное значение частоты изменит свое значение соответственно. Пройдя через обратную связь, сигнал частоты преобразуется в сигнал напряжения. На устройстве ССУ значения задающего воздействия и сигнала обратной связи будут сравниваться. В зависимости от отклонения выходной координаты будет формироваться сигнал, при котором значение частоты вращения двигателя достигнет нужного результата.

На рисунке 1 приведена заданная принципиальная схема САР частоты вращения двигателя постоянного тока. [20]

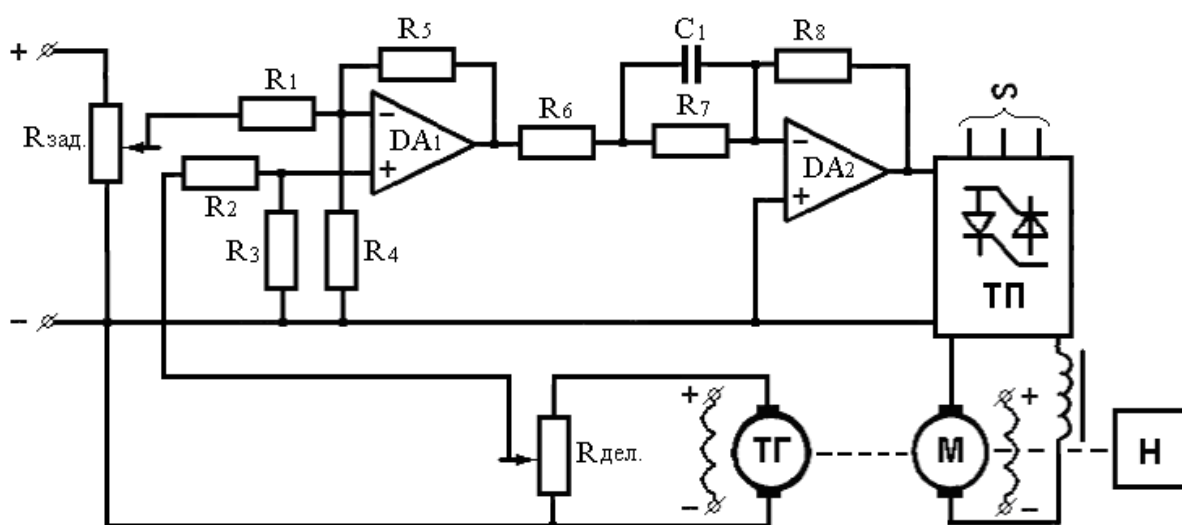


Рисунок 1 – Принципиальная схема САР

Опишем каждый из элементов, входящих в САР частоты вращения двигателя постоянного тока:[10]

### 1. Питание САР (рисунок 2)

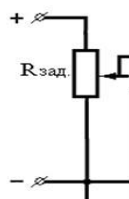


Рисунок 2 – Питание

### 2. Сравнивающее - суммирующее устройство (ССУ) предназначено для сравнения и суммирования сигналов (рисунок 3)

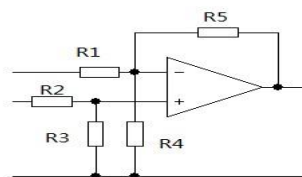


Рисунок 3 – ССУ

$$\Delta U_{\text{вых}}(t) = K_{y2} * \Delta U_2(t) - K_{y1} * \Delta U_1(t)$$

$$\text{Где } K_{y1} = \frac{R_5}{R_1} \quad K_{y2} = \frac{R_5}{R_2}$$

### 3. Активная корректирующая цепь (АКЦ) (рисунок 4)

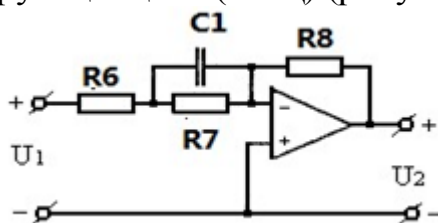


Рисунок 4 – АКЦ

$$(T_2 p + 1) \Delta U_2(t) = - (T_1 p + k_1) \Delta U_1(t),$$

$$\text{Где } K_1 = \frac{R_8}{R_6 + R_7}, \quad T_1 = \frac{R_8 R_6}{R_6 + R_7} \cdot C_1$$

$$T_2 = \frac{R_6 R_7}{R_6 + R_7} \cdot C_1$$

### 4. Тиристорный преобразователь (ТП) (рисунок 5)



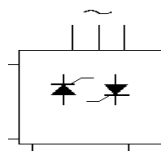


Рисунок 5 – Тиристорный преобразователь

$$(T_{\text{тп}}p + 1) * \Delta U_2(t) = K_{\text{тп}} * \Delta U_1(t)$$

Где  $U_1$  – напряжение на входе ТП;

$U_2$  – напряжение на выходе ТП;

$K_{\text{тп}}$  – коэффициент передачи ТП;

$T_{\text{тп}}$  – постоянная времени ТП.

#### 5. Двигатель постоянного тока (ДПТ) (рисунок 6)

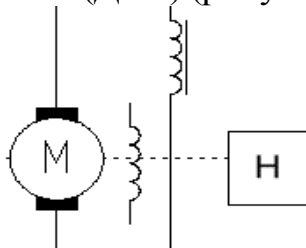


Рисунок 6 – ДПТ

$$(T_z T_m p^2 + T_m p + 1) * \Delta \omega(t) = K_{\text{д1}} * \Delta U_{\text{я}}(t) - K_{\text{д2}} * (T_z p + 1) * \Delta M_{\text{с}}(t)$$

Где  $\omega$  – частота вращения выходного вала;

$U_{\text{я}}$  – напряжение на якоре;

$M_{\text{с}}$  – момент сопротивления на валу;

$K_{\text{д1}}$  и  $K_{\text{д2}}$  – коэффициенты передачи по напряжению и моменту;

$T_z$  и  $T_m$  – электромагнитная и электромеханическая постоянные времени.

#### 6. Датчик скорости (ДС) (рисунок 7)

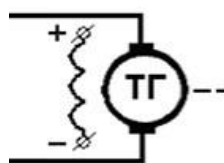


Рисунок 7 – Датчик скорости

$$(T_{\text{дс}}p + 1) * \Delta U_{\text{дс}}(t) = K_{\text{дс}} \Delta \omega(t)$$

Где  $\omega$  – частота вращения вала ДС;

$U_{дс}$  – напряжение на выходе ДС;

$K_{дс}$  – коэффициент передачи ДС;

$T_{дс}$  – постоянная времени ДС

## 7. Делитель (рисунок 8)

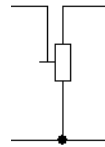


Рисунок 8 – Делитель

$$\Delta U_2(t) = K_{п} * U_1(t), \quad \text{где} \quad K_{п} = \frac{R''}{R}.$$

## 1.2 Функциональная и структурная схемы САР

Функциональная схема САР имеет вид

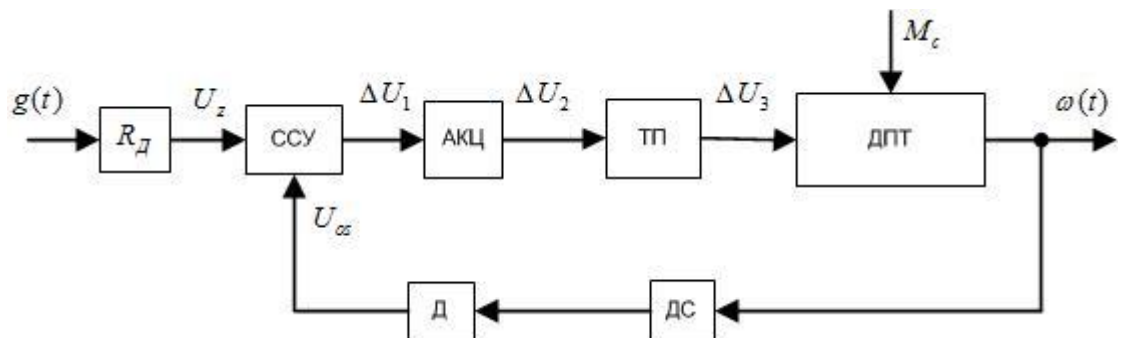


Рисунок 9 – Функциональная схема САР

На схеме обозначены: задающее воздействие –  $g(t)$ , возмущающий фактор –  $f(t)$ , выходная величина –  $\omega(t)$ .

Для составления структурной схемы САР частоты вращения двигателя постоянного тока необходимо найти передаточные функции всех элементов системы.

Для получения передаточных функций применим преобразование Лапласа ( $t \rightarrow s$ ,  $p \rightarrow s$ ). Покажем его на примере сравнивающе-суммирующего устройства[12]:

$$\Delta U_{\text{вых}}(t) \rightarrow \Delta U_{\text{вых}}(s)$$

$$\Delta U_2(t) \rightarrow \Delta U_2(s)$$

$$\Delta U_1(t) \rightarrow \Delta U_1(s)$$

По определению передаточная функция любого элемента САР равна отношению выходного воздействия ко входному в изображении  $s$  и при нулевых условиях.

Применим принцип суперпозиции: реакция системы на входные воздействия, действующие одновременно, равна сумме реакций на каждое из воздействий. Запишем передаточную функцию ССУ:

$$W_1(s) = K_{y1} \quad W_2(s) = -K_{y2}$$

По аналогии находим передаточные функции остальных звеньев САР:

1. Активная корректирующая цепь (АКЦ):

$$W(s) = \frac{T_1 s + K_1}{T_2 s + 1}$$

2. Тиристорный преобразователь (ТП):

$$W(s) = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП} s + 1}$$

3. Двигатель постоянного тока (ДПТ):

$$W_1(s) = \frac{K_{Д1}}{T_{\mathcal{E}} T_M s^2 + T_M s + 1}$$

$$W_2(s) = \frac{-K_{Д2} (T_{\mathcal{E}} s + 1)}{T_{\mathcal{E}} T_M s^2 + T_M s + 1}$$

4. Датчик скорости (ДС):

$$W(s) = \frac{K_{ДС}}{T_{ДС} s + 1}$$

5. Делитель (Д):

$$W(s) = K_{\Pi}$$

Получив передаточные функции всех элементов САР частоты вращения двигателя постоянного тока, можем составить структурную схему

системы (рисунок 10). Она получена путем замены элементов функциональной схемы соответствующими им передаточными функциями.

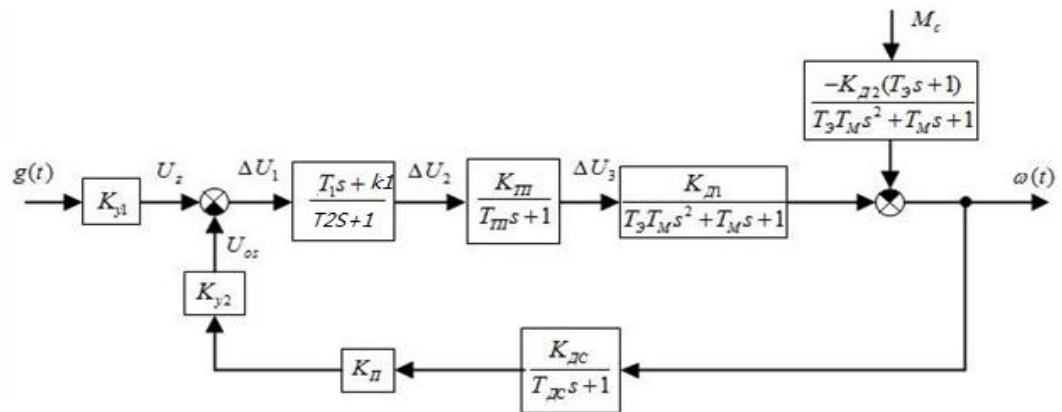


Рисунок 10 – Структурная схема САР частоты вращения ДПТ

### 1.3 Передаточная функция замкнутой САР по управлению

На основании структурной схемы на рисунке 10 получаем структурную схему САР по задающему воздействию (рисунок 11)[12]:

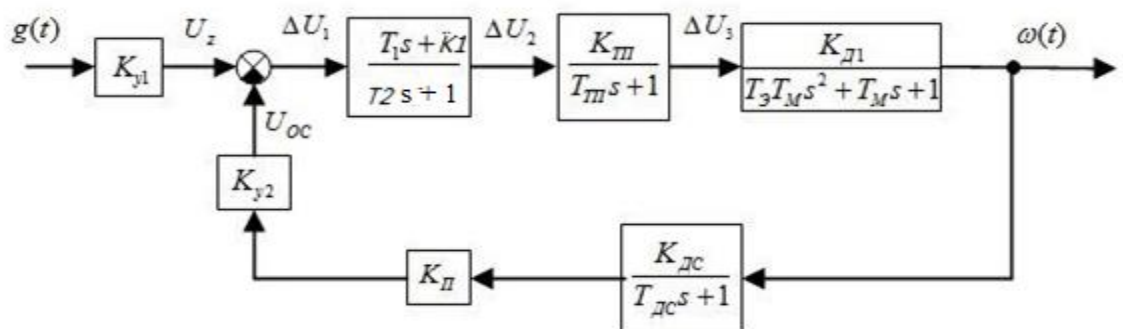


Рисунок 11 – Структурная схема замкнутой САР по задающему воздействию

На основе построенной структурной схемы получена передаточная функция по задающему воздействию:

$$W(K_{g1}, T_m, s) := \frac{K_{y1} \cdot \frac{T_1 \cdot s + K_1}{(T_2 \cdot s + 1) \cdot (T_{tp} \cdot s + 1) \cdot (T_e \cdot T_m \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1)} \cdot (K_{g1} \cdot K_{tp})}{1 + \frac{(T_1 \cdot s + K_1) \cdot K_{tp} \cdot K_{g1} \cdot K_{gc} \cdot K_p \cdot K_{y2}}{(T_2 \cdot s + 1)(T_{tp} \cdot s + 1)(T_e \cdot T_m \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1)(T_{gc} \cdot s + 1)}}$$

$$W(K_{g1}, T_m, s) := \frac{K_{y1} \cdot (T_1 \cdot s + K_1) \cdot (T_{gc} \cdot s + 1) \cdot (K_{g1} \cdot K_{tp})}{(T_2 \cdot s + 1)(T_{tp} \cdot s + 1)(T_e \cdot T_m \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1)(T_{gc} \cdot s + 1) + (T_1 \cdot s + K_1) \cdot K_{tp} \cdot K_{g1} \cdot K_{gc} \cdot K_p \cdot K_{y2}}$$

#### 1.4 Характеристическое уравнение САР

На основании полученной передаточной функции запишем характеристический полином исследуемой САР:

$$B(K_{g1}, T_m, s) = T_2 \cdot T_m \cdot T_{gc} s^3 + [T_{gc} \cdot (T_2 + T_m) + T_2 \cdot T_m] s^2 + (T_2 + T_m + T_{gc} + K_p \cdot K_{g1} \cdot K_{y2} \cdot K_{gc} \cdot K_{tp} \cdot T_1) s + K_1 \cdot K_p \cdot K_{d1} \cdot K_{y2} \cdot K_{gc} \cdot K_{tp} + 1$$

В общем виде :

$$b_3 = T_2 \cdot T_m \cdot T_{gc}$$

$$b_2 = T_{gc} \cdot (T_2 + T_m) + T_2 \cdot T_m$$

$$b_1 = T_2 + T_m + T_{gc} + K_p \cdot K_{d1} \cdot K_{y2} \cdot K_{gc} \cdot K_{tp} \cdot T_1$$

$$b_0 = K_1 \cdot K_p \cdot K_{g1} \cdot K_{y2} \cdot K_{gc} \cdot K_{tp} + 1$$

Значения данных для заданной САР приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

$K_{y1}$	$K_{y2}$	$T_1$ с	$T_2$ с	$T_{dc}$ с	$K_{гп}$	$T_{гп}$	$K_{d1}$ рад/ (В* с)	$K_{d2}$ рад/ (Н* м*с)	$T_{э}$ с	$T_m$ с	$K_{п}$	$K_{дс}$ В*с/ рад	$K_1$ Н* м
5	5	0.059	0.109	0.012	2	0		2.8	0		0,25	0,4	2,5

Параметры  $K_{d1}, T_m$  являются интервальными

$$K_{d1} \in [2; 3], T_m \in [0.05; 0.08].$$

Тогда характеристический полином САР можно записать в виде

$$B(K_{d1}, T_m, s) = 0.001308 \cdot T_m \cdot s^3 + (0.121 \cdot T_m + 0.001308) s^2 + (0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121) s + 2.5 \cdot K_{g1} + 1$$

В общем виде :

$$b_3 = 0.001308 \cdot T_m$$

$$b_2 = 0.121 \cdot T_m + 0.001308$$

$$b_1 = 0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121$$

$$b_0 = 2.5 \cdot K_{g1} + 1$$

## 2 Анализ быстродействия и колебательности САР скорости двигателя с интервальными параметрами

### 2.1 Отображение многогранника интервальных параметров САР на плоскость корней на основе реберной теоремы

Для отображения многогранника интервальных параметров САР на корневую плоскость воспользуемся реберной теоремой. [5]

*Реберная теорема.* Характеристический полином системы будет устойчив в каждой точке многогранника его интервально-неопределенных параметров, если он будет устойчив на всех ребрах многогранника. [4,16]

На рисунке 12 приведена графическая интерпретация реберной теоремы при отображении всех ребер многогранника параметров на плоскость корней. Граничные образы ребер определяют области локализации полюсов САР при всех возможных изменениях интервальных параметров САР. [6]

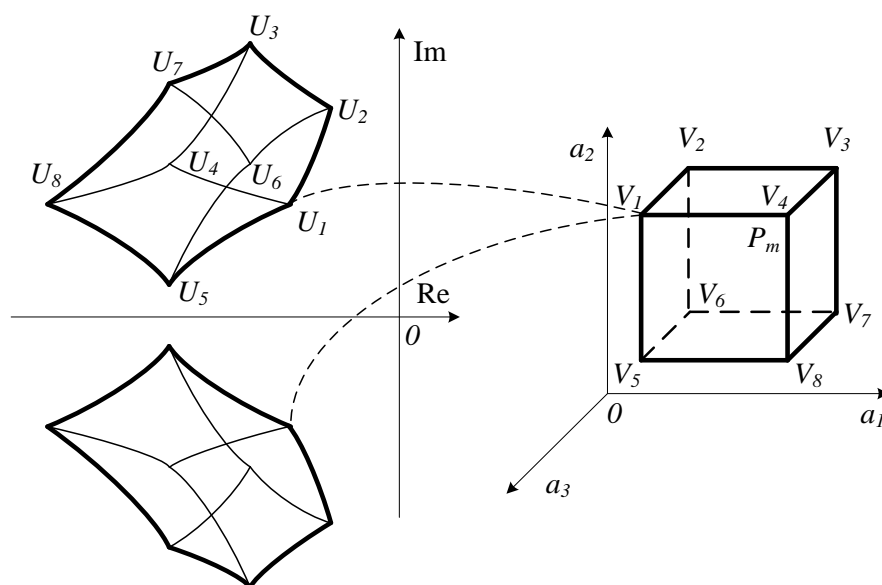


Рисунок 12 – Отображение параметрического многогранника САР на корневую плоскость

Для исследуемой САР область изменения параметров представляет собой прямоугольник, показанный на рисунке 13.

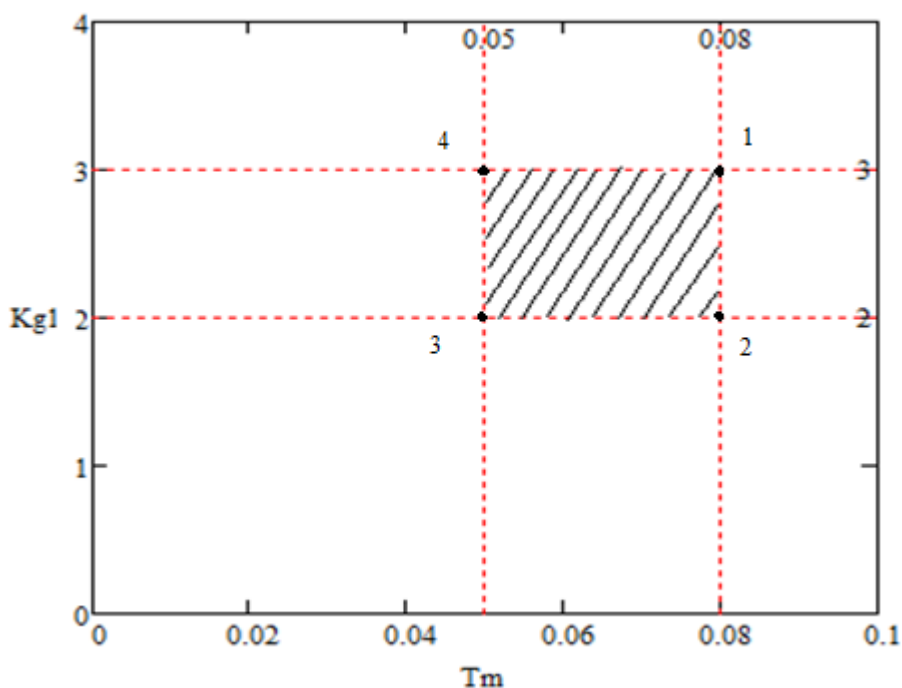


Рисунок 13 – Область изменения параметров САР

## 2.2 Построение многопараметрического интервального корневого годографа

Траектории, которые описывают корни характеристического уравнения замкнутой системы при изменении одного из ее параметров от 0 до  $\infty$ , называют корневым годографом. [1,2]

В нашем случае параметры системы изменяются не от 0 до бесконечности, а только в определенных интервалах. При этом число изменяющихся параметров больше единицы. Поэтому корневой годограф системы с несколькими интервальными параметрами получил название многопараметрического интервального корневого годографа.

Для его построения используем Mathcad. Расчет корней для интервального параметра  $K_{d1}$  проведем следующим образом [11]

$$Kg11 := 2, 2.01.. 3 \quad Tm1 := 0.05, 0.08.. 0.08$$

$$A10(Kg11, Tm1) := 2.5 \cdot Kg11 + 1 \quad A11(Kg11, Tm1) := 0.059 \cdot Kg11 + Tm1 + 0.121$$

$$A12(Kg11, Tm1) := 0.121 \cdot Tm1 + 0.001308 \quad A13(Kg11, Tm1) := 0.001308 \cdot Tm1$$

$$V1(Kg11, Tm1) := \text{polyroots} \left( \begin{pmatrix} A10(Kg11, Tm1) \\ A11(Kg11, Tm1) \\ A12(Kg11, Tm1) \\ A13(Kg11, Tm1) \end{pmatrix} \right)$$

$$R0(Kg11, Tm1) := \text{Re}(V1(Kg11, Tm1))_0 \quad \underline{I0}(Kg11, Tm1) := \text{Im}(V1(Kg11, Tm1))_0$$

$$R1(Kg11, Tm1) := \text{Re}(V1(Kg11, Tm1))_1 \quad \underline{I1}(Kg11, Tm1) := \text{Im}(V1(Kg11, Tm1))_1$$

$$R2(Kg11, Tm1) := \text{Re}(V1(Kg11, Tm1))_2 \quad I2(Kg11, Tm1) := \text{Im}(V1(Kg11, Tm1))_2$$

$$R3(Kg11, Tm1) := \text{Re}(V1(Kg11, Tm1))_3 \quad I3(Kg11, Tm1) := \text{Im}(V1(Kg11, Tm1))_3$$

Рассчитаем корни для интервального параметра  $T_m$

$$Kg12 := 2, 3.. 3 \quad Tm2 := 0.05, 0.051.. 0.08$$

$$A20(Kg12, Tm2) := 2.5 \cdot Kg12 + 1 \quad A21(Kg12, Tm2) := 0.059 \cdot Kg12 + Tm2 + 0.121$$

$$A22(Kg12, Tm2) := 0.121 \cdot Tm2 + 0.001308 \quad A23(Kg12, Tm2) := 0.001308 \cdot Tm2$$

$$V2(Kg12, Tm2) := \text{polyroots} \left( \begin{pmatrix} A20(Kg12, Tm2) \\ A21(Kg12, Tm2) \\ A22(Kg12, Tm2) \\ A23(Kg12, Tm2) \end{pmatrix} \right)$$

$$Q0(Kg12, Tm2) := \text{Re}(V2(Kg12, Tm2))_0 \quad S0(Kg12, Tm2) := \text{Im}(V2(Kg12, Tm2))_0$$

$$Q1(Kg12, Tm2) := \text{Re}(V2(Kg12, Tm2))_1 \quad S1(Kg12, Tm2) := \text{Im}(V2(Kg12, Tm2))_1$$

$$Q2(Kg12, Tm2) := \text{Re}(V2(Kg12, Tm2))_2 \quad S2(Kg12, Tm2) := \text{Im}(V2(Kg12, Tm2))_2$$

$$Q3(Kg12, Tm2) := \text{Re}(V2(Kg12, Tm2))_3 \quad S3(Kg12, Tm2) := \text{Im}(V2(Kg12, Tm2))_3$$

В результате проведенных операций получим матрицы значений искомых корней. Отображая их соответственно на комплексную плоскость, получим двухпараметрический интервальный корневой годограф, представленный на рисунке 14.[3,8,18,19]



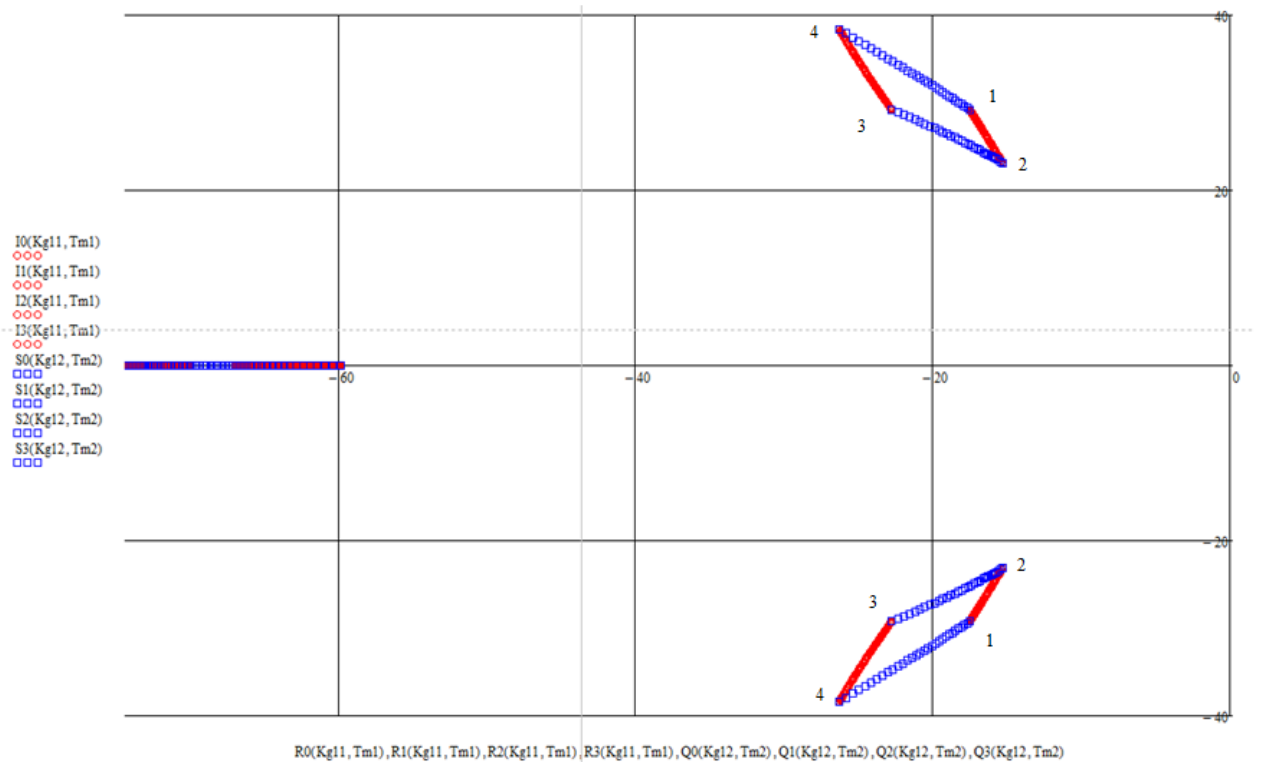


Рисунок 14 – Многопараметрический интервальный корневой годограф

### 2.3 Анализ корневых показателей качества САР

Корневые показатели качества системы используются для косвенной оценки качества управления. Они определяются расположением корней характеристического полинома замкнутой САР. [9,17]

Характер переходного процесса в САР можно оценить по полюсам передаточной функции замкнутой системы на основе анализа корней характеристического уравнения САР

$$A(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0$$

При оценке качества САР по корням характеристического уравнения определяют область расположения корней, как это показано на рисунке 15.

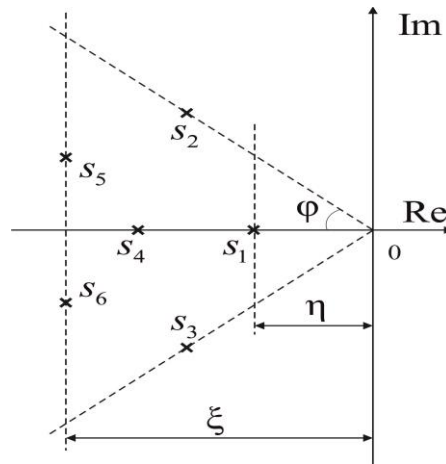


Рисунок 15 – Границы области корней

Границы области на рисунке 15 определяются следующими параметрами:

$\eta$  – степень устойчивости систем, которая определяется расстоянием от мнимой оси до ближайшего к ней действительного корня или пары комплексно сопряженных корней. Характеризует длительность переходного процесса

$\mu$  – степень колебательности системы, которая определяется парой комплексно-сопряженных корней, имеющих наибольшее соотношение

$$\mu = \left| \frac{\text{Im } s_{q_i}}{\text{Re } s_{q_i}} \right|$$

Рассмотрим эти параметры.

По критерию длительности  $\eta$  можно оценить степень быстродействия системы.

Зная  $\eta$ , мы можем найти время регулирования или переходного процесса по следующему соотношению

$$t_p \leq \frac{1}{\eta} \ln \frac{1}{\Delta},$$

где  $\Delta$  – половина ширины области, при попадании в которую переходной процесс считается завершенным. Если  $\Delta = 0,05$ , а крайний корень действительный, то имеем

$$t_p = \frac{1}{\eta} \ln \frac{1}{0,05} \approx \frac{3}{\eta}.$$

Степень колебательности  $\mu$  дает возможность определить колебательные свойства системы и соответственно вид переходного процесса. Она определяется по углу  $\varphi$  следующим образом

$$\mu = \operatorname{tg} \varphi = \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)_{\max}.$$

$$\mu = \max_{\nu} \operatorname{tg} \varphi_{\nu} = \operatorname{tg} \varphi_{\max},$$

$$\mu = \max_{\nu} \left| \frac{\operatorname{Im} \lambda_{\nu}}{\operatorname{Re} \lambda_{\nu}} \right|.$$

где  $\alpha, \beta$  – соответственно действительная и мнимая части комплексно сопряженной пары корней, расположенных на границе области.

Если САР имеет несколько изменяющихся параметров, то ее полюсы мигрируют по комплексной плоскости, образуя области локализации. По этим областям можно определить минимальную степень устойчивости САР и максимальную колебательность системы. Они определяют наихудшие режимы работы САР и называются соответственно степенью робастной устойчивости и степенью робастной колебательности. Для анализируемой САР скорости двигателя эти показатели качества определены на рисунке 16.

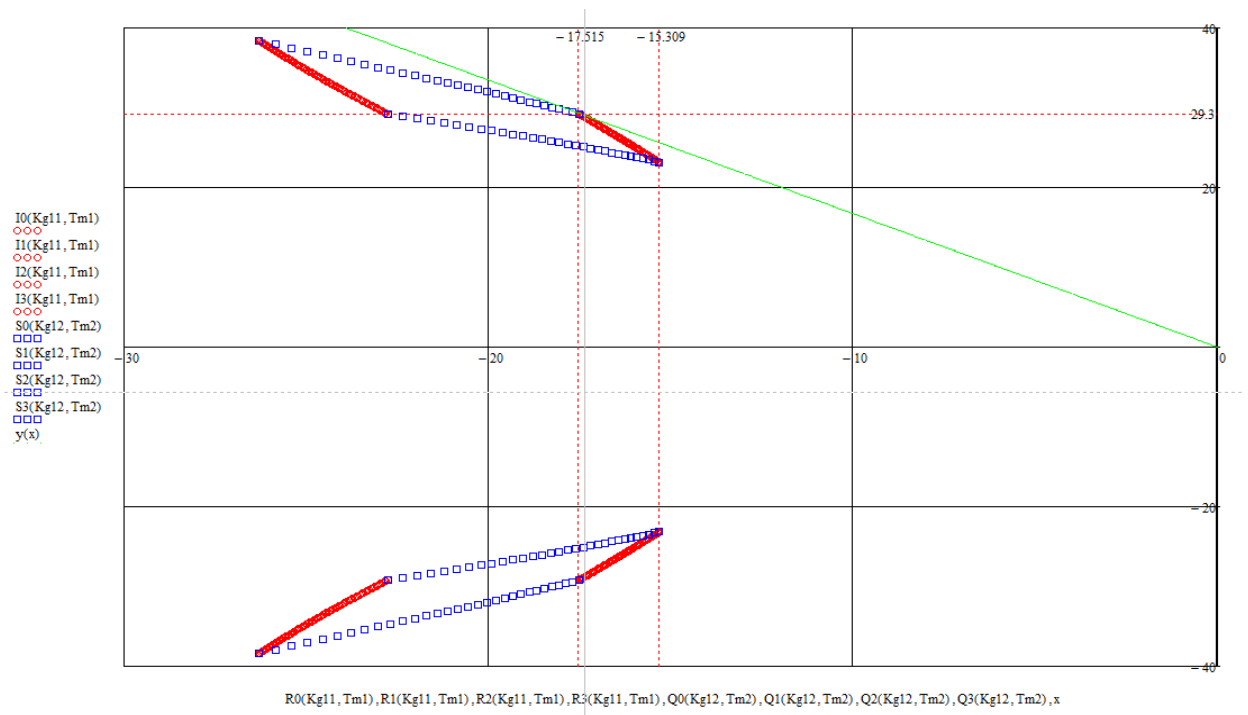


Рисунок 16 – Многопараметрический интервальный корневой годограф

Из рисунка 16 видно, что степень робастной устойчивости  $\eta=15,309$ , степень робастной колебательности  $\mu=1,673$ . Можно также заключить, что степень устойчивости САР при изменении двух ее параметров в границах области на рисунке 13 изменяется в диапазоне от 15,3 до 26,5, а степень колебательности - в диапазоне от 1,29 до 1,67.

### **3 Анализ чувствительности коэффициентных показателей качества САУ к интервальным параметрам системы**

#### **3.1 Исследование систем с переменными параметрами с помощью теории чувствительности**

Степень влияния изменения отдельных параметров системы на различные ее динамические характеристики оценивают по чувствительности. Чувствительность – это показатель, характеризующий способность системы изменять свои динамические свойства под влиянием того или иного параметра.[15]

Теория чувствительности в настоящее время разработана достаточно полно. Большое число работ посвящено методам получения функций чувствительности и их применению к многомерным, нелинейным, разрывным и импульсным системам. Если заданные требования к динамическим свойствам формулируются на основе требований к чувствительности системы, то теория чувствительности позволяет решать некоторые задачи синтеза систем управления.

В настоящее время теория чувствительности позволяет выработать единый теоретический подход к решению многих задач создания САУ.

При исследовании САУ, как правило, применяют прямые оценки чувствительности, определяемые как частные производные показателей качества управления по некоторым параметрам САУ.

Серьезным препятствием для исследования систем на основе теории чувствительности является изменение параметров САУ в широких пределах.

Аналитические методы синтеза систем с использованием теории чувствительности пока не получили достаточного развития, так как при формировании желаемых характеристик чувствительности приходится сталкиваться с серьезными трудностями.

Чтобы упростить задачу анализа и синтеза линейных систем, желательно иметь достаточно простые и по возможности аналитические связи между чувствительностью основных качественных показателей

системы (быстродействия, колебательности, запасов устойчивости, статических свойств) и ее параметрами, причем не только для стационарного случая, но и для всего диапазона изменения параметров объекта управления.

### 3.2 Коэффициентные показатели качества САР

Рассмотрим линейную стационарную непрерывную систему с характеристическим многочленом[23]

$$F_n(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0, \quad a_i > 0, \quad (1)$$

где коэффициенты положительны, что является необходимым условием расположения всех корней полинома в левой полуплоскости. Введем в рассмотрение вспомогательные параметры  $\lambda_i$ , образуемые четверками рядом стоящих коэффициентов характеристического :

$$\lambda_i = \frac{a_{i-1} a_{i+2}}{a_i a_{i+1}}, \quad i = \overline{1, n-2}.$$

Характер ограничений, накладываемых на параметры  $\lambda_i$  условиями устойчивости для системы низкого порядка, сохраняется для систем более высокого порядка. Поэтому эти параметры  $\lambda_i$  можно называть показателями устойчивости.

Введем некоторую систему параметров, «ответственную» за форму процессов в системе и за быстродействие. Как и показатели устойчивости  $\lambda_i$ , эти параметры очень просто связать с коэффициентами передаточной функции линейной системы и с искомыми параметрами. С их помощью можно получить некоторую оценку колебательности системы, для чего следует использовать совокупность параметров, отличную от совокупности коэффициентов нормированного уравнения. Эти параметры для характеристического многочлена (1) можно задать в следующем виде:

$$\delta_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}}, \quad i = \overline{1, n-1}.$$

Следует отметить, что параметры  $\delta_i$  являются безразмерными и не изменяются при изменении коэффициента масштаба характеристического многочлена, т.е. как и нормированные коэффициенты, они не характеризуют

быстродействие системы, а только определяют форму ее временных процессов.

Запишем характеристическое уравнение САР скорости двигателя с переменными параметрами  $K_{д1}$  и  $T_m$

$$A(s) = a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0, \quad (2)$$

$$\text{где } a_0 = 2.5K_{д1} + 1;$$

$$a_1 = 0.059K_{д1} + T_m + 0.121;$$

$$a_2 = 0.121T_m + 0.001308;$$

$$a_3 = 0.001308T_m;$$

Оценим устойчивость САР по показателям устойчивости  $\lambda_1$ .

$$\lambda_1 = \frac{a_0 a_3}{a_1 a_2} = \frac{(2.5K_{д1} + 1) \cdot 0.001308T_m}{(0.059K_{д1} + T_m + 0.121) \cdot (0.121T_m + 0.001308)}$$

$K_{д1}, T_m$  являются интервальными параметрами, следовательно  $\lambda_1$  является интервальным показателем. [7]

$$[\lambda_1] = [\underline{\lambda}_1; \overline{\lambda}_1] = \frac{[a_0] \cdot [a_3]}{[a_1] \cdot [a_2]} = \frac{[\underline{a_0} \cdot \underline{a_3}; \overline{a_0} \cdot \overline{a_3}]}{[\underline{a_1} \cdot \underline{a_2}; \overline{a_1} \cdot \overline{a_2}]}$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\overline{a_0} \cdot \overline{a_3}}{\underline{a_1} \cdot \underline{a_2}} = \frac{(2.5\overline{K_{д1}} + 1) \cdot 0.001308\overline{T_m}}{(0.059\underline{K_{д1}} + \underline{T_m} + 0.121) \cdot (0.121\underline{T_m} + 0.001308)}$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{(2.5 \cdot 3 + 1) \cdot 0.001308 \cdot 0.08}{(0.059 \cdot 2 + 0.05 + 0.121) \cdot (0.121 \cdot 0.05 + 0.001308)} = 0.418 < 0.465$$

Для устойчивости системы с характеристическим многочленом (2) достаточно, чтобы выполнялось неравенство  $\overline{\lambda}_1 = 0.418 < 0.465$ . Так как оно выполняется, то система устойчива при любых возможных изменениях ее интервальных параметров.

### 3.3 Чувствительность показателей качества САР к изменению параметров системы

Введем следующие понятия чувствительности  $\lambda_i$  и  $\delta_i$  к некоторому переменному параметру  $\sigma$ :

– чувствительность показателя устойчивости

$$S_{\sigma}^{\lambda_i} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{a_{i-1} a_{i+2}}{a_i a_{i+1}} \right), \quad i = 1, 2, \dots, m-1, m, m+1, \dots, n-2;$$

– чувствительность показателя формы

$$S_{\sigma}^{\delta_i} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{a_i^2}{a_{i+1} a_{i-1}} \right), \quad i = 1, 2, \dots, m-1, m, m+1, \dots, n-3, \dots, n-1;$$

Найдем зависимость чувствительности показателя устойчивости САР скорости двигателя от параметра  $K_{д1}$  при  $T_m = 0.078$ .

$$\lambda_1(K_{г1}) := \frac{(2.5 \cdot K_{г1} + 1) \cdot (0.001308 \cdot T_m)}{(0.059 \cdot K_{г1} + T_m + 0.121) \cdot (0.121 \cdot T_m + 0.001308)}$$

$$S\lambda_1(K_{г1}) := \frac{d}{dK_{г1}} \lambda_1(K_{г1})$$

$$S\lambda_1(K_{г1}) \text{ collect, } K_{г1} \rightarrow \frac{2.485418e6}{2.078157e6 \cdot K_{г1}^2 + 1.4018754e7 \cdot K_{г1} + 2.3641797e7}$$

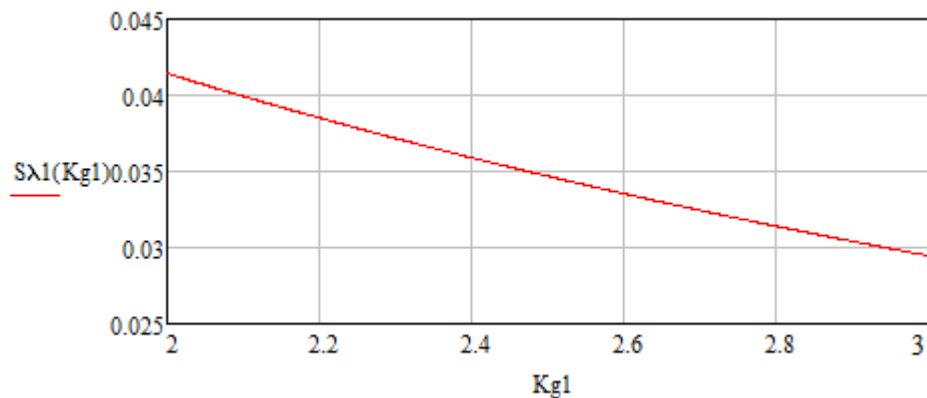


Рисунок 17 – Оценка чувствительности показателя устойчивости  $\lambda_1$  к параметру  $K_{д1}$

Чувствительность по показателю  $\lambda_1$  положительная. Это означает, что с увеличением  $K_{д1}$  показатель  $\lambda_1$  возрастает, что может привести к нарушению достаточного условия устойчивости. Из рисунка 17 видно, что значение чувствительности при  $K_{д1} = 3$  меньше, чем при  $K_{д1} = 2$ . Это соответствует изменению корней на рисунке 14 при изменении  $K_{д1}$ . [23]

Чувствительность показателей формы процессов:



$$\delta_1(K_{g1}) := \frac{(0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121)^2}{(0.121 \cdot T_m + 0.001308) \cdot (2.5 \cdot K_{g1} + 1)} \quad S\delta_1(K_{g1}) := \frac{d}{dK_{g1}} \delta_1(K_{g1})$$


---


$$\delta_2(K_{g1}) := \frac{(0.121 \cdot T_m + 0.001308)^2}{(0.001308 \cdot T_m) \cdot (0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121)} \quad S\delta_2(K_{g1}) := \frac{d}{dK_{g1}} \delta_2(K_{g1})$$

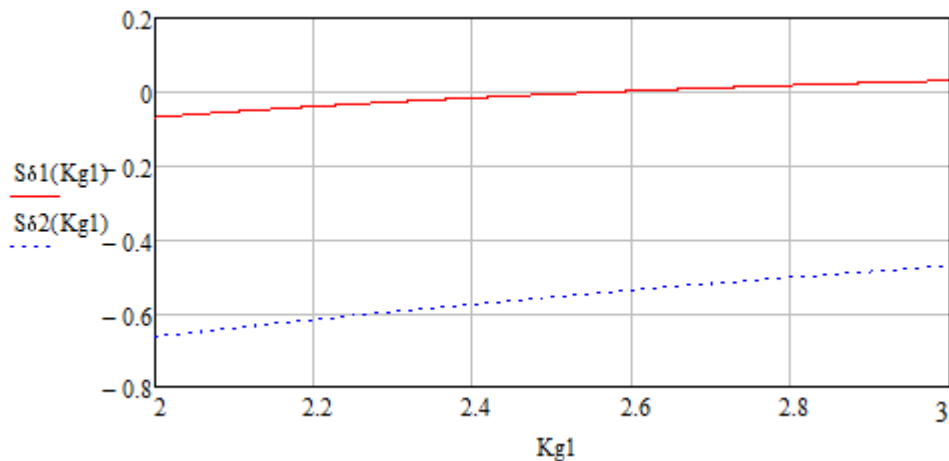


Рисунок 18 – Оценка чувствительности показателей качества  $\delta_1$  и  $\delta_2$  к параметру  $K_{д1}$

Чувствительность показателя формы  $S_{K_{д1}}^{\delta_2}$  и часть чувствительности показателя формы  $S_{K_{д1}}^{\delta_1}$  отрицательные. Это означает, что показатель качества  $\delta_1$  и  $\delta_2$  при увеличении переменного параметра  $K_{д1}$  только уменьшается.

Однако, у оценки чувствительности показателя формы  $S_{K_{д1}}^{\delta_1}$  есть положительная часть, что приводит к росту параметра  $\delta_1$  с увеличением переменного параметра  $K_{д1}$ , и, как следствие, к увеличению показателя колебательности системы.

Найдем зависимость чувствительности показателя устойчивости САР скорости двигателя от параметра  $T_m$  при  $K_{д1} = 2,5$ .

$$\lambda_1(T_m) := \frac{(2.5 \cdot K_{g1} + 1) \cdot (0.001308 \cdot T_m)}{(0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121) \cdot (0.121 \cdot T_m + 0.001308)}$$

$$S\lambda_1(T_m) := \frac{d}{dT_m} \lambda_1(T_m)$$

$$S\lambda_1(T_m) \text{ collect, } T_m \rightarrow -\frac{2.8686075e14 \cdot T_m^2 - 8.326026585e11}{3.66025e15 \cdot T_m^4 + 2.04468825e15 \cdot T_m^3 + 3.067983320625e14 \cdot T_m^2 + 5.9346316035e12 \cdot T_m + 3.0835008801e10}$$

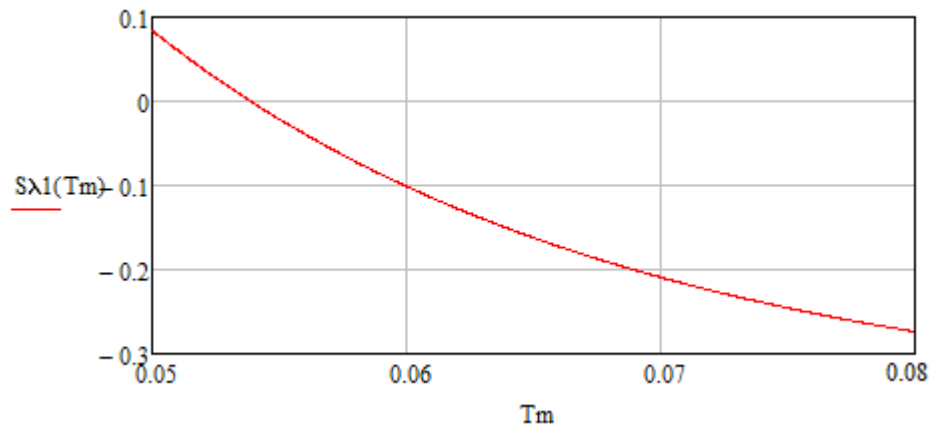


Рисунок 19 – Оценка чувствительности показателя устойчивости  $\lambda_1$  к параметру  $T_m$

На начальном участке диапазона  $T_m$  чувствительность по показателю  $\lambda_1$  положительная. Это означает, что с увеличением  $T_m$  показатель  $\lambda_1$  возрастает, что может привести к нарушению достаточного условия устойчивости.

Наличие участка  $T_m$  с отрицательной чувствительностью означает, что с увеличением  $T_m$ , показатель  $\lambda_1$  уменьшается, следовательно, запас устойчивости по показателю  $\lambda_1$  только увеличивается.

Чувствительность показателей формы процессов:

$$\delta_1(T_m) := \frac{(0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121)^2}{(0.121 \cdot T_m + 0.001308) \cdot (2.5 \cdot K_{g1} + 1)} \quad S\delta_1(T_m) := \frac{d}{dT_m} \delta_1(T_m)$$

$$\delta_2(T_m) := \frac{(0.121 \cdot T_m + 0.001308)^2}{(0.001308 \cdot T_m) \cdot (0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121)} \quad S\delta_2(T_m) := \frac{d}{dT_m} \delta_2(T_m)$$

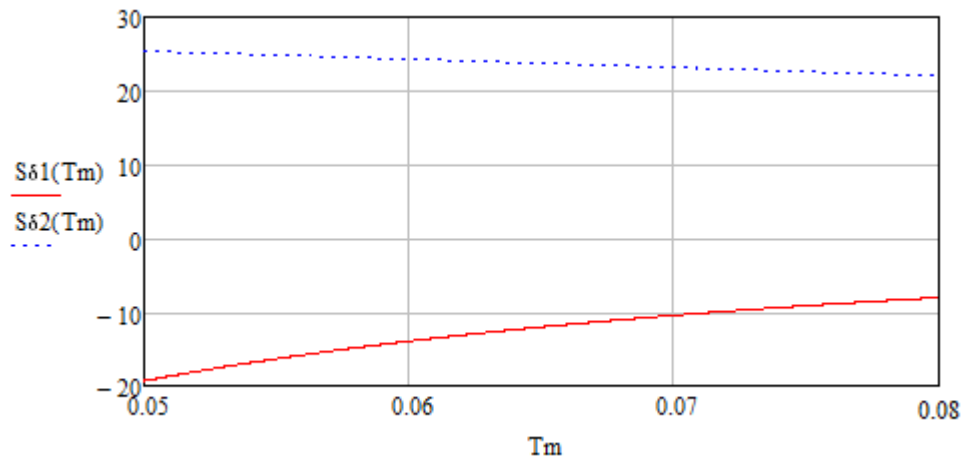


Рисунок 20 – Оценка чувствительности показателей качества  $\delta_1$  и  $\delta_2$  к параметру  $T_m$

Чувствительность показателя формы  $S_{T_m}^{\delta_1}$  отрицательная. Это означает, что показатель качества  $\delta_1$  при увеличении переменного параметра  $T_m$  только уменьшается.

Оценка чувствительности показателя формы  $S_{T_m}^{\delta_2}$  положительная, что приводит к росту параметра  $\delta_2$  с увеличением переменного параметра  $T_m$ , и, как следствие, к увеличению показателя колебательности системы.

## 4 Моделирование САР скорости двигателя с интервальными параметрами

### 4.1 Переходные процессы САР в вершинах многогранника интервальными параметрами

Проведем моделирование САР в пакете MATLAB. Поставим значения всех параметров из таблицы 1. Модель системы показана на рисунке 21.[13,14,21]

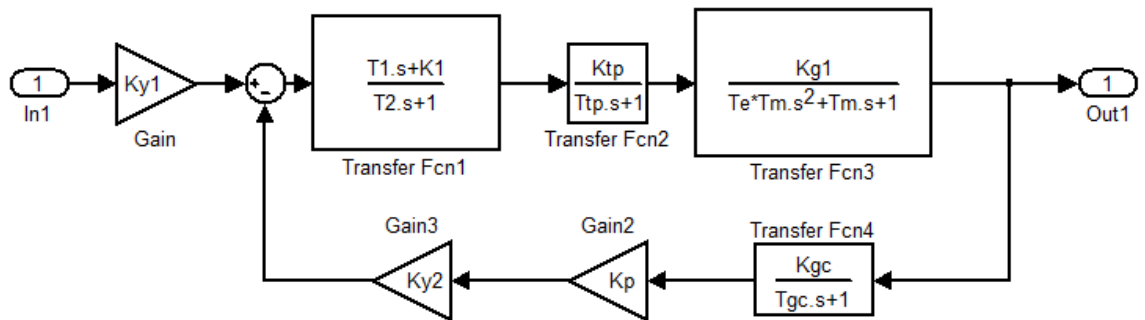


Рисунок 21 – Структурная схема замкнутой САР по задающему воздействию в среде MATLAB

Передаточная функция САР по управлению

1) tf1 при  $K_{d1min} = 2$ ,  $T_{min} = 0.05$

$$tf1 \quad W(Kg1min, Tmin, s) \text{ collect, } s \rightarrow \frac{70800.0 \cdot s^2 + 8.9e6 \cdot s + 2.5e8}{327.0 \cdot s^3 + 36790.0 \cdot s^2 + 1.445e6 \cdot s + 3.0e7}$$

2) tf2 при  $K_{d1min} = 2$ ,  $T_{max} = 0.08$

$$tf2 \quad W(Kg1min, Tmax, s) \text{ collect, } s \rightarrow \frac{88500.0 \cdot s^2 + 1.1125e7 \cdot s + 3.125e8}{654.0 \cdot s^3 + 68675.0 \cdot s^2 + 1.99375e6 \cdot s + 3.75e7}$$

3) tf3 при  $K_{d1max} = 3$ ,  $T_{min} = 0.05$

$$tf3 \quad W(Kg1max, Tmin, s) \text{ collect, } s \rightarrow \frac{106200.0 \cdot s^2 + 1.335e7 \cdot s + 3.75e8}{327.0 \cdot s^3 + 36790.0 \cdot s^2 + 1.74e6 \cdot s + 4.25e7}$$

4) tf4 при  $K_{d1max} = 3$ ,  $T_{max} = 0.08$

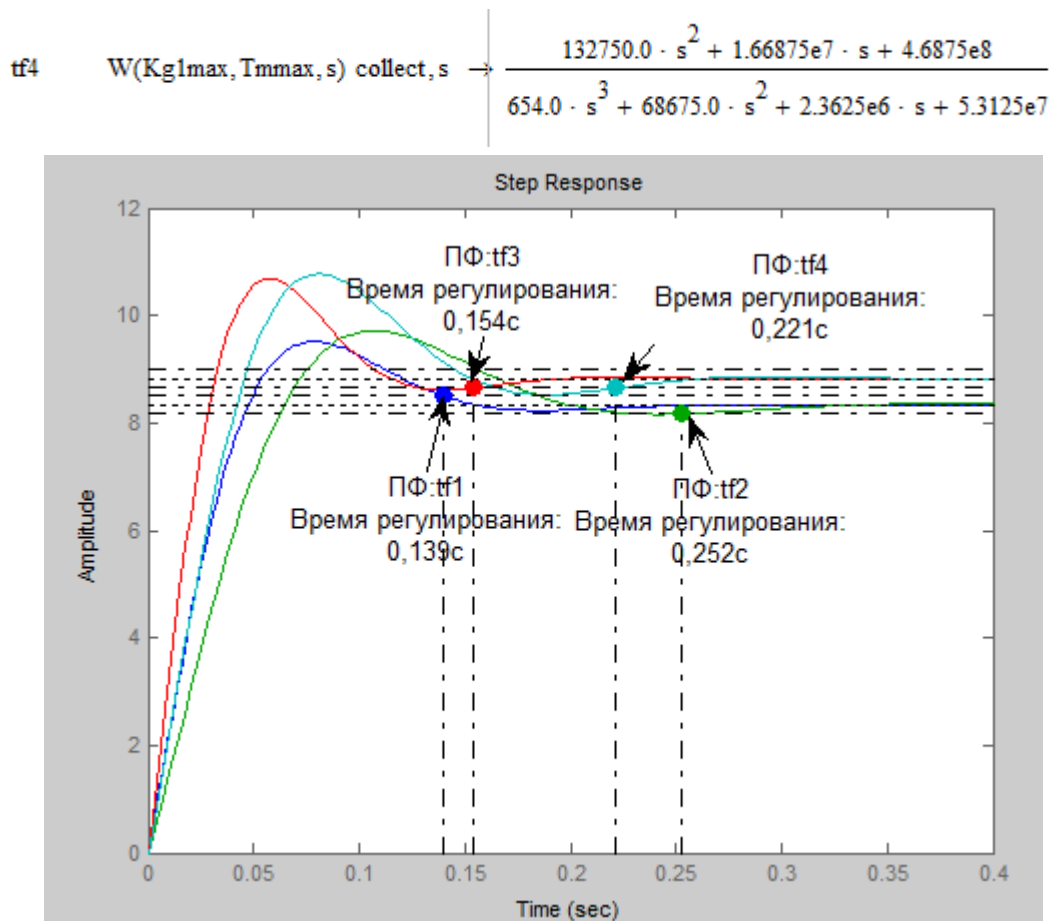


Рисунок 22 – Переходные процессы САР в вершинах многогранника интервальных параметров

Из графиков на рисунке 22 можно сделать следующие выводы. Наибольшее время регулирования имеет САР в вершине, соответствующей максимальному значению  $T_m$  и минимальному значению  $K_{d1}$  ( $K_{d1min} = 2$ ,  $T_{mmax} = 0.08$ ). Полюсы САР, соответствующие этой вершине, расположены наиболее близко к мнимой оси (см. рисунок 16).

Наибольшее по амплитуде первое колебание на графике переходного процесса соответствует вершине ( $K_{d1max} = 3$ ,  $T_{mmax} = 0.08$ ), которая определяет максимальный сектор расположения областей полюсов САР, показанных на рисунке 16.

## 4.2 Анализ переходных процессов САР при изменении $T_m$

Передаточная функция по управлению

1) tf5 при  $K_{d1ave} = 2,5$ ,  $T_{mmin} = 0.05$

$$W(K_{d1ave}, T_{mmin}, s) \text{ collect, s} \rightarrow \frac{88500.0 \cdot s^2 + 1.1125e7 \cdot s + 3.125e8}{327.0 \cdot s^3 + 36790.0 \cdot s^2 + 1.5925e6 \cdot s + 3.625e7}$$

2) tf6 при  $K_{d1ave} = 2,5$ ,  $T_{max} = 0.08$

$$W(K_{d1ave}, T_{max}, s) \text{ collect, s} \rightarrow \frac{110625.0 \cdot s^2 + 1.390625e7 \cdot s + 3.90625e8}{654.0 \cdot s^3 + 68675.0 \cdot s^2 + 2.178125e6 \cdot s + 4.53125e7}$$

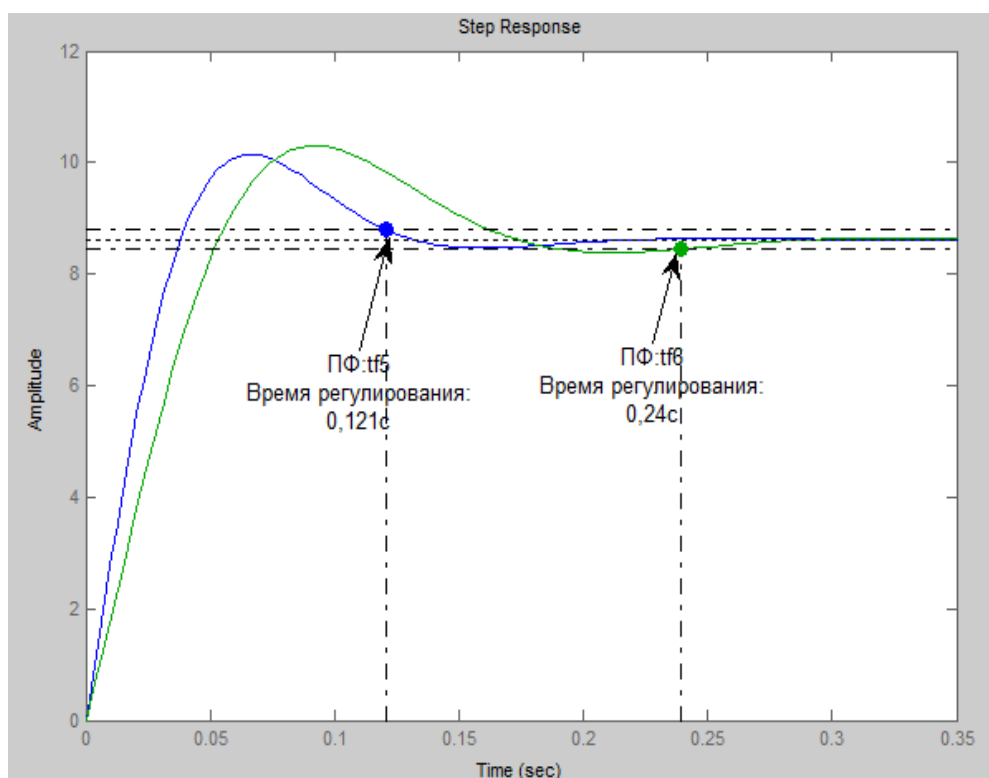


Рисунок 23 – Переходные процессы САР при крайних значениях интервального параметра  $T_m$

Из графиков на рисунке 23 можно сделать следующий вывод: чем больше  $T_m$ , тем больше время регулирования переходного процесса.

## 4.3 Анализ переходных процессов САР при изменении $K_{d1}$

Передаточная функция по управлению

1) tf7 при  $T_{mave} = 0.065$ ,  $K_{d1min} = 2$ ,

$$W(K_{d1min}, T_{mave}, s) \text{ collect, s} \rightarrow \frac{708000.0 \cdot s^2 + 8.9e7 \cdot s + 2.5e9}{4251.0 \cdot s^3 + 458650.0 \cdot s^2 + 1.52e7 \cdot s + 3.0e8}$$

2) tf8 при  $T_{mave} = 0.065$ ,  $K_{d1max} = 3$ ,

$$W(K_{d1max}, T_{mave}, s) \text{ collect, s} \rightarrow \frac{1.062e6 \cdot s^2 + 1.335e8 \cdot s + 3.75e9}{4251.0 \cdot s^3 + 458650.0 \cdot s^2 + 1.815e7 \cdot s + 4.25e8}$$

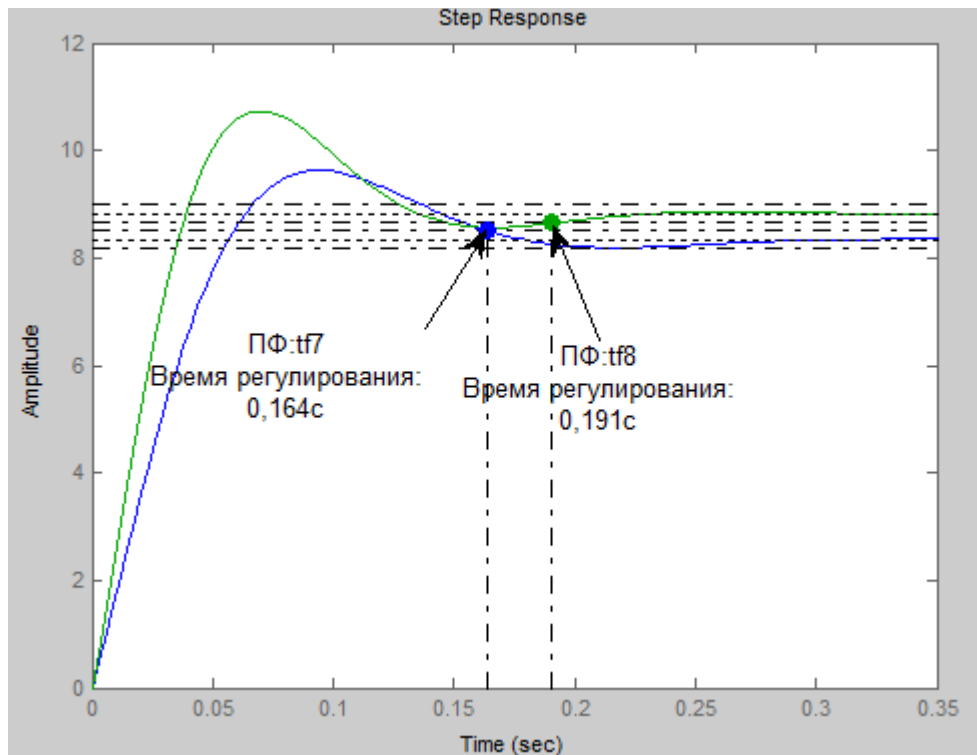


Рисунок 24 – Переходные процессы САР при приделе интервального параметра  $K_{d1}$

Из графиков на рисунке 24 можно сделать следующий вывод: чем больше  $K_{d1}$ , тем больше колебательность и время регулирования переходного процесса.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию, а также уровня их научно-технической результативности.

### **5.1 Организация и планирование работ**

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

На данном этапе составляется полный перечень проводимых работ, и определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом планирования работ является **сетевой**, либо **линейный график** реализации проекта. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является использование линейного графика. Для его построения составим перечень работ и соответствие работ своим исполнителям, продолжительность выполнения этих работ и сведем их в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

<b>Этапы работы</b>	<b>Исполнители</b>	<b>Загрузка исполнителей</b>
<b>Подготовительный этап</b>		
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 80% И – 80%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 100%
Изучение предметной области	И	И – 100%
<b>Анализ динамических свойств системы автоматического</b>		



<b>регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами</b>		
Расчет модели, приведение полученных результатов	НР, И	НР – 30% И – 100%
Оформление методики синтеза регулятора	НР, И	НР – 10% И – 100%
<b>Экономическое обоснование</b>		
Анализ перспективности разработки, оценка целесообразности разработки и затрат	И	И – 100%
<b>Анализ опасных и вредных производственных факторов</b>		
Анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды, защита в чрезвычайных ситуациях, правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	И	И – 100%
<b>Документирование</b>		
Составление и согласование расчетно-пояснительной записки	НР, И	НР – 10% И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 100% И – 100%

### 5.1.1 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ осуществляется двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

В данном случае используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Для определения ожидаемого значения продолжительности работ  $t_{ож}$  применяется вероятностный метод – метод двух оценок  $t_{min}$  и  $t_{max}$ .

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (5.1)$$

где  $t_{min}$  – минимальная трудоемкость работ, чел/дн.;

$t_{max}$  – максимальная трудоемкость работ, чел/дн.

Для выполнения перечисленных в таблице 5.2 работ требуются специалисты:

- инженер;
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (5.2)$$

где  $t_{ож}$  – трудоемкость работы, чел/дн.;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ ( $K_{ВН} = 1$ );

$K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ( $K_{Д} = 1.2$ ).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} \cdot T_{\text{К}}, \quad (5.3)$$

где  $T_{\text{РД}}$  – продолжительность выполнения этапа в рабочих днях;

$T_{\text{КД}}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{\text{К}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (5.4)$$

где  $T_{\text{КАЛ}}$  – календарные дни ( $T_{\text{КАЛ}} = 365$ );

$T_{\text{ВД}}$  – выходные дни ( $T_{\text{ВД}} = 52$ );

$T_{\text{ПД}}$  – праздничные дни ( $T_{\text{ПД}} = 10$ ).

$$T_{\text{К}} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205$$

В таблице 5.2 приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе

Таблица 5.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Подготовительный этап								
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	1	2	1,4	1,68	-	2,02	-
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	4	6	4,8	2,88	5,76	3,47	6,93
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,4	1,68	1,68	2,02	2,02
Изучение предметной области	И	7	10	8,2	-	9,84	-	11,85
Анализ динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами								
Расчет модели, приведение полученных результатов	И	14	20	16,4	1,39	19,68	1,67	23,69
Оформление методики синтеза регулятора	И	5	7	5,8	-	6,96	-	8,39

Экономическое обоснование								
Анализ перспективности разработки, оценка целесообразности разработки и затрат	И	3	5	3,8	–	4,56	-	5,49
<b>Анализ динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами</b>								
Анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды, защита в чрезвычайных ситуациях, правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	И	1	2	1,4	-	1,68	-	2,02
<b>Документирование</b>								
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	3	5	3,8	–	4,56	-	5,49
Оформление графического материала	И	3	5	3,8	–	4,56	-	5,49
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,4	1,68	1,68	2,02	2,02
<b>Всего:</b>				52,2	9,31	60,96	11,2	73,39

### 5.1.2 Расчет накопления готовности работ

Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов выполнена работа на каждом этапе. Данная величина вычисляется по формуле:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}, \quad (5.5)$$

где  $TP_{общ.}$  – общая трудоемкость проекта;

$TP_i$  ( $TP_k$ ) – трудоемкость  $i$ -го ( $k$ -го) этапа проекта,  $i = \overline{1, I}$ ;

$TP_i^H$  – накопленная трудоемкость  $i$ -го этапа проекта по его завершении;

$TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) – трудоемкость работ, выполняемых  $j$ -м участником на  $i$ -м этапе, здесь  $j = \overline{1, m}$  – индекс исполнителя,  $m = 2$ .

Результаты вычислений отражены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i$ , %	$CG_i$ , %
Постановка целей и задач, получение исходных данных	2,03	2,03
Составление и утверждение ТЗ	10,47	12,5
Разработка календарного плана	4,07	16,57
Изучение предметной области	12,93	29,5
Расчет модели, приведение полученных результатов	25,67	55,17
Оформление методики синтеза регулятора	15,87	71,04
Анализ перспективности разработки, оценка целесообразности разработки и затрат	6,13	77,17

Анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды, защита в чрезвычайных ситуациях, правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	4,53	81,7
Составление и согласование расчетно-пояснительной записки	7,7	89,4
Оформление графического материала	5,53	94,93
Подведение итогов	5,07	100

Таблица 5.4 – Линейный график работ.

Этап	Н	И	Март			Апрель			Май			Июнь	
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
1	2,02	-											
2	3,47	6,93											
3	2,02	2,02											
4	-	11,85											
5	1,67	23,69											
6	-	8,39											
7	-	5,49											
8	-	2,02											
9	-	5,49											
10	-	5,49											
11	2,02	2,02											

НР –  И – 



## 5.2 Расчет сметы затрат на создание макета КУ

В состав затрат на создание проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- основная заработная плата;
- отчисления в социальные фонды;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- работы, выполняемые сторонними организациями;
- прочие расходы.

### 5.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам и приведена в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Расходные материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	150	2уп.	300
Ручка шариковая	10	2 шт.	20
Карандаш	10	1 шт.	10
Оплетка для расчетно-пояснительной записки	40	1 шт.	40
<b>Итого:</b>			<b>370</b>

Пусть ТЗР составляет 5% от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны

$$C_{\text{мат}} = 370 \cdot 1,05 = 388,5 \text{ рубль.}$$

### 5.2.2 Расчет основной заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/24,83 \quad (5.6)$$

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 5.6. При расчете учитывалось, что в году 298 рабочих дней и, следовательно, в месяце 24,83 рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 5.2. Также был принят во внимание учитывающий коэффициент дополнительной заработной платы  $K_{\text{ДЗП}} = 1,1$ ;  $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$ ;  $K_p = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{\text{и}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699$ .

Таблица 5.6 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23 264,86	936,97	9	1,699	14327,21
И	7 915	318,77	61	1,699	33037
<b>Итого:</b>					<b>47364,21</b>

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили

$$C_{\text{осн}} = 47364,21 \text{ руб.}$$

### 5.2.3 Расчет отчислений от заработной платы

Затраты по этой статье составляют отчисления по единому социальному налогу (ЕСН).

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{\text{соц}} = K_{\text{соц}} \cdot C_{\text{осн}}, \quad (5.7)$$

где  $K_{\text{соц}}$  – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 30% от затрат на заработную плату и включает в себя:

- 1) отчисления в пенсионный фонд;
- 2) на социальное страхование;
- 3) на медицинское страхование.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{соц}} = 0,3 \cdot 47364,21 = 14209,26 \text{ руб}$$

### 5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}} \quad (5.8)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $Ц_{\text{э}} = 5,257 \text{ руб./кВт·час}$  (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 5.4 для инженера ( $T_{\text{рд}}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t,$$

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_c, \quad (5.9)$$

где  $P_{\text{ном}}$  – установленная мощность оборудования, кВт;

$K_C$  – коэффициент спроса, зависящий от количества, загрузки групп электроприемников.

Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $\text{Э}_{\text{ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	317	0,3	499,94
Струйный принтер	1	0,1	0,53
<b>Итого:</b>			<b>500,47</b>

### 5.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» от используемого оборудования рассчитывается амортизация за время выполнения работы для оборудования, которое имеется в наличии.

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{N_A \cdot C_{\text{ОБ}}}{F_d} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n, \quad (5.10)$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации,  $N_A = 25\%$ ;

$C_{\text{ОБ}}$  – цена оборудования,  $C_{\text{ОБ}} = 45000$  руб.;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени,  $F_d = 2384$  часа;

$t_{\text{рф}}$  – фактическое время работы оборудования при создании программного продукта,  $t_{\text{рф}} = 317$  часа;

$n$  – число задействованных ПЭВМ,  $n = 1$ .

Итак, затраты на амортизационные отчисления составили:

$$C_{AM} = \frac{0,25 \cdot 45000 \cdot 1 \cdot 317}{2384} = 1495,91 \text{ руб.}$$

Для принтера  $C_{OB} = 12000$  руб., его  $F_D = 500$  час.,  $N_A = 50\%$ , тогда его амортизация составит:

$$C_{AM} = \frac{0,5 \cdot 12000 \cdot 1}{500} = 36 \text{ руб.}$$

Итого  $C_{AM} = 1495,91 \text{ руб} + 36 \text{ руб.} = 1531,91 \text{ руб.}$

### 5.2.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на разработку проекта, которые не учтены в предыдущих статьях. Их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,1 \quad (5.11)$$

Подставим значения и вычислим:

$$C_{\text{проч.}} = (388,5 + 47364,21 + 14209,26 + 500,47 + 1531,91) \cdot 0,1 = 6399,435 \text{ руб.}$$

### 5.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет сметы затрат на разработку, можно определить общую стоимость разработки проекта.

Таблица 5.8 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	388,5
Основная заработная плата	$C_{\text{ОСН}}$	47364,21
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{СОЦ}}$	14209,26
Расходы на электроэнергию	$\mathcal{E}$	500,47
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	1531,91
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{НР}}$	–
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	6399,435
<b>Итого:</b>		<b>70393,785</b>

Таким образом, расходы на разработку составили  $C = 70393,785$  руб.

### 5.2.8 Прибыль

Примем прибыль в размере 5 - 20 % от полной себестоимости проекта. В нашем случае она составляет 14078,757 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

### 5.2.9 НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$(70393,785 + 14078,757) * 0,18 = 15205,058 \text{ руб.}$$

### 5.2.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 70393,785 + 14078,757 + 15205,058 = 99677,6 \text{ руб}$$

### **5.3 Оценка экономической эффективности проекта**

В рамках работы не представляется возможным оценить экономическую эффективность проекта, потому что для этого необходимо проводить полноценное исследование.

В процессе работы был произведен анализ динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами.

Результатом выполнения работы является получение устойчивой системы автоматического управления с интервальными параметрами функционирования и заданным объектом управления.

Значимость данной работы состоит в том, что на ее примере возможен анализ динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами по рассмотренному в ней методу без особых экономических затрат.

Представленный метод может быть реализован в широком круге производств.

Экономический эффект характеризуется повышением качества регулирования систем автоматического управления, с переходным процессом заданной длительности без перерегулирования и меньше время регулирования.

#### **5.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР**

Научно-технический уровень характеризует, в какой мере выполнены работы и обеспечивается научно-технический прогресс в данной области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод балльных оценок. Балльная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям или рассчитывают по формуле. На этой основе делается вывод о целесообразности НИР.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент ее научно-технического уровня по формуле:

$$K_{\text{НТУ}} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (5.12)$$

где  $K_{\text{НТУ}}$  – коэффициент научно-технического уровня;  
 $R_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го признака научно-технического эффекта;  
 $n_i$  – количественная оценка  $i$ -го признака научно-технического эффекта, в баллах.

Таблица 5.9 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признак научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИОКР	$R_i$
Уровень новизны	Систематизируются и обобщаются сведения, определяются пути дальнейших исследований	0,4
Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0,1
Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,5

Таблица 5.10 – Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4



Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0
----------------------	---------------------------------------	---

Таблица 5.11 – Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
Установка закона, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ, взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 5.12 – Возможность реализации научных, теоретических результатов по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Результаты оценок признаков научно-технического уровня приведены в таблице 5.13. Баллы по параметрам времени и масштабам реализации при расчете складываются. Исходя из оценки признаков НИОКР, показатель научно-технического уровня для данного проекта составил:

$$K_{\text{нту}} = 0,4 \cdot 4 + 0,1 \cdot 6 + 0,5 \cdot 10 = 1,6 + 0,1 + 5 = 7,2$$

Таким образом, исходя из данных в таблице 5.13, проект имеет средний уровень научно-технического эффекта.

Таблица 5.13 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень НТЭ	Показатель НТЭ
Низкий	1-4
Средний	4-7
Высокий	8-10

Обоснование оценки признаков НИОКР приводится в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Сводная таблица оценки научно-технического уровня НИР

Фактор НТУ	Значимость	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
Уровень новизны	0,4	Относительно новая	4	Данный метод объединяет опыт предыдущих разработок в этом направлении, учитывает их недостатки и представляет более выгодный алгоритм анализа динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами

Теоретический уровень	0,1	Разработка способа (алгоритма)	6	Следуя изложенному в методе алгоритму возможен анализ динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами без особых экономических затрат.
Возможность реализации	0,5	В течение первых лет	10	Возможность реализации в кратчайшие сроки

## **6 Социальная ответственность**

### **6.1 Производственная безопасность**

Объектом исследования является моделирование системы.

При анализе динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами, работа выполняется на компьютере, состоящего из системного блока и монитора, Работа производится сидя, при небольшом физическом напряжении. Рабочее место представляет собой компьютерный стол с персональным компьютером.

В связи с этим в данном разделе будет разработан комплекс мероприятий, который позволит свести к минимуму или ликвидировать негативные влияния факторов, возникающие при моделировании системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами[24].

#### **6.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследования**

Цылый ряд негативных факторов, которые может создать объект исследования САР скорости двигателя с интервальными параметрами, показанный в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Опасные и вредные факторы при исследовании ИПП

Источник фактора	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Персональный компьютер	1. Отклонение параметров микроклимата; 2. Недостаточная освещённость рабочего места; 3. Повышенный уровень шума на рабочем месте; 4. Повышенная напряженность магнитного поля. 5. повышенный уровень электромагнитных полей	Электрический ток	ГОСТ 12.0.003-74; СанПиН 2.2.4-548-96 [25]; СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [26]; ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ [27]; СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [24].

Вредные проявления факторов рассматриваемой рабочей зоны выражаются в электромагнитном и электрическом излучениях (ЭМИ и ЭСИ). Объясняется это тем, что ПК оснащают сетевыми фильтрами, источниками бесперебойного питания и другим оборудованием, что в совокупности формирует сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя. Техногенные ЭМП приводят к следующему: появление головной боли, повышение температуры тела, ожоги, катаракты. Радиочастотное ЭМП влияет на нервную и сердечно – сосудистую системы [24].

Источником ЭСП является экран ПК и трение поверхности клавиатуры и компьютерной мыши. ЭСП может способствовать нарушению гормональной и иммунной систем.

Показатели ЭМИ и ЭСИ на рабочих местах с ПК представлены в таблице 6.2[26].

Таблица 6.2 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПК

Наименование параметров		ВДУ ЭМИ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Микроклимат производственных помещений - это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха.

При работе с ПК должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата: температура воздуха, поверхностей, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха.

Лаборатория является помещением, относящимся к категории помещений, где выполняются легкие физические работы, поэтому должны соблюдаться следующие требования:

Таблица 6.3 – Оптимальные показатели микроклимата на рабочем месте производственных помещений для категории работ Ia

Период года	Температура воздуха, С	Температура поверхностей, С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22 – 24	21 – 25	60 – 40	0,1
Теплый	23 – 25	22 – 26	60 – 40	0,1

Важнейшим физическим фактором является освещенность производственного помещения в целом и рабочего места конкретно. С этой целью производят нормирование производственного освещения, поскольку такие показатели как: яркость дисплея экрана, частота обновления изображения,

общая освещенность в рабочей зоне оказывают сильнейшее влияние на зрение работника.

Работа, выполняемая с использованием ПК, имеют следующие недостатки:

- отражение экрана.
- вероятность появления прямой блескости;
- ухудшенная контрастность между изображением и фоном;

При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5...1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0%. В качестве источников искусственного освещения используются люминесцентные лампы типа ЛБ, которые попарно объединяются в светильники, которые должны располагаться над рабочими поверхностями равномерно [28].

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300лк, а комбинированная - 750лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности - 200 и 300лк соответственно.

При работе с ПК возникают акустические поля. Воздействие шума может привести к ухудшению слуха. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте кроме того приводит к снижению внимания персонала, замедлению скорости психических реакций [27]. Источниками шумовых помех могут стать вентиляционные установки, кондиционеры, ЭВМ и его периферийные устройства. Длительное воздействие этих шумов отрицательно сказывается на эмоциональном состоянии персонала.

Таблица 6.4 – Допустимый уровень звукового давления по видам трудовой деятельности [29]

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Научная деятельность в лаборатории для теоретических работ	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

### **6.1.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов**

Для создания и поддержания в лаборатории оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года должно использоваться водяное отопление, а в теплое время года применяться кондиционирование воздуха.

На рабочем месте должно применяться также искусственное освещение помимо естественного, которое осуществляется системой общего равномерного освещения, а при работе с документами следует применять комбинированное освещение. Кроме того, рабочий стол следует размещать таким образом, чтобы естественный свет падал слева.

Работа за компьютером относится к V зрительному разряду (работа малой точности).

Следовательно, требуемая освещенность помещения может быть обеспечена следующими типами ламп:

- люминесцентная лампа белого свечения (ЛБ) или холодного белого свечения (ЛХБ);
- металлогалогенная лампа (МГЛ);
- ртутная лампа высокого давления (ДРЛ);

На рабочем месте желательно применение комбинированной системы освещения: люминесцентные лампы типа ЛД. Люминесцентные лампы имеют ряд существенных преимуществ: излучаемый ими свет близок к дневному,



естественному свету; обладают повышенной светоотдачей, имеют более длительный срок службы [28].

Согласно ГОСТ 12.1.003-2014[29] эквивалентный уровень звука не должен превышать 50 дБА.

В качестве мер по снижению шума можно предложить следующее:

- облицовка потолка и стен звукопоглощающим материалом. Снижает шум на 6-8 дБ;
- рациональная планировка помещения.
- установка в компьютерных помещениях оборудования, производящего минимальный шум;
- экранирование рабочего места, путем постановкой перегородок, диафрагм;

Дисплеи должны проходить испытания на соответствие требованиям безопасности, например, международным стандартам MRP 2, TCO 99.

## **6.2 Экологическая безопасность**

Работа с ПК не влечет за собой негативных воздействий на окружающую среду, поэтому создание санитарно-защитной зоны и принятие мер по защите атмосферы, гидросферы, литосферы не являются необходимыми.

Исключением являются лишь случаи утилизации персонального компьютера и индукционного преобразователя как твердого отхода и как следствие загрязнение почвы или выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, углекислого газа, образование тепла в случае пожара.

При завершении срока службы ПК, его можно отнести к отходам электронной промышленности. Переработка таких отходов осуществляется разделением на однородные компоненты, химическим выделением пригодных для дальнейшего использования компонентов и направлением их для дальнейшего использования (например, кремний, алюминий, золото, серебро, редкие металлы) согласно [30][31]. Пластмассовые части ПК утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха.

Части компьютера, печатные платы, содержащие тяжелые металлы и замедлители горения могут при горении выделять опасные диоксиды. Поэтому для опасных отходов существуют специальные печи, позволяющие использовать теплоту сжигания. Но подобный способ утилизации является дорогостоящим, поэтому не стоит исключать вероятность образования токсичных выбросов.

Отходы, не подлежащие переработке и вторичному использованию, подлежат захоронению на полигонах или в почве. Предельно допустимые концентрации токсичных веществ в почве (ПДКп, мг/кг) должны быть соблюдены в соответствии с [25].

### **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.**

Вероятной чрезвычайной ситуацией возникающей при проведении анализа динамических свойств системы автоматического регулирования скорости двигателя с интервальными параметрами является пожар.

При этом причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей которые могут привести к короткому замыканию или пробоем изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

Пожарная профилактика представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара. Для профилактики пожара чрезвычайно важна правильная оценка пожароопасности здания, определение

опасных факторов и обоснование способов и средств пожар предупреждения и защиты[32].

Одно из условий обеспечения пожаробезопасности - ликвидация возможных источников воспламенения.

В целях предотвращения пожара предлагается проводить с инженерами, работающими в лаборатории, противопожарный инструктаж.

В лаборатории источниками воспламенения могут быть неисправное электрооборудование, неисправности в электропроводке, электрических розетках и выключателях.

Несоблюдение мер пожарной безопасности и курение в помещении также может привести к пожару. Поэтому курение в помещении лаборатории необходимо категорически запретить.

В случае возникновения пожара необходимо отключить электропитание, вызвать по телефону пожарную команду, эвакуировать людей из помещения согласно плану эвакуации и приступить к ликвидации пожара углекислотными огнетушителями.

При наличии небольшого очага пламени можно воспользоваться подручными средствами с целью прекращения доступа воздуха к объекту возгорания.

#### **6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.**

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить федеральный закон “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”.

За состоянием безопасности труда установлены строгие государственный, ведомственный и общественный надзор и контроль. Государственный надзор осуществляют специальные государственные органы и инспекции, которые в своей деятельности не зависят от администрации

контролирующих предприятий. Это Прокуратура РФ, Федеральный горный и промышленный надзор России, Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности, Государственный энергетический надзор РФ, Государственный комитет санитарно-эпидемиологического надзора РФ (Госкомсанэпиднадзор России), Федеральная инспекция труда при Министерстве труда РФ; Министерство РФ по атомной энергии.

Контроль за состоянием условий труда на предприятиях осуществляют специально созданные службы охраны труда совместно с комитетом профсоюзов. Контроль за состоянием условий труда заключается в проверке состояния производственных условий для работающих, выявлении отклонений от требований безопасности, законодательства о труде, стандартов, правил и норм охраны труда, постановлений, директивных документов, а также проверке выполнения службами, подразделениями и отдельными группами своих обязанностей в области охраны труда. Этот контроль осуществляют должностные лица и специалисты, утвержденные приказом по административному подразделению. Ответственность за безопасность труда в целом по предприятию несут директор и главный инженер.

Ведомственные службы охраны труда совместно с комитетами профсоюзов разрабатывают инструкции по безопасности труда для различных профессий с учетом специфики работы, а также проводят инструктажи и обучение всех работающих правилам безопасной работы. Различают следующие виды инструктажа: вводный, первичный на рабочем месте, повторный внеплановый и текущий.

Результаты всех видов инструктажа заносят в специальные журналы. За нарушение всех видов законодательства по безопасности жизнедеятельности предусматривается следующая ответственность: дисциплинарная, административная, уголовная, материальная.

Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности работника, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера обеспечивает ему удобное положение при работе

и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

Рабочее место - это часть пространства, в котором работник осуществляет трудовую деятельность, и проводит большую часть рабочего времени.

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям [33].

Кроме того, стоит сократить время работы за компьютером, делать перерывы при 8-ми часовой смене.

Письменный стол и офисное кресло являются главными составляющими на рабочем месте. Основным рабочим положением является положение сидя. Поэтому для исключения возникновения заболеваний, связанных с малой подвижностью работника, необходимо иметь возможность свободной перемены поз.

Кроме того, необходимо соблюдать режим труда и отдыха с перерывами, заполняемыми “отвлекающими” мышечными нагрузками на те звенья опорно-двигательного аппарата, которые не включены в поддержание основной рабочей позы.

Рабочий стул должен быть снабжен подъемно-поворотным механизмом. Высота сиденья должна регулироваться в пределах (400 - 500) мм. Глубина сиденья должна составлять не менее 380 мм, а ширина - не менее 400 мм. Высота опорной поверхности спинки не менее 300 мм, ширина - не менее 380 мм. Угол наклона спинки стула к плоскости сиденья должен изменяться в пределах (90 – 110)°.

## Заключение

В результате выполненной работы был проведен анализ качества САР скорости двигателя, параметры которой могут изменяться в известных пределах по заранее неизвестным для проектировщика законам. Для этого было получено характеристическое уравнение САР, в коэффициенты которого линейно входят интервальные параметры. Они образуют параметрический многогранник, задающий все возможные режимы работы САР. Для анализа ее динамических свойств использован корневой подход и на основе реберной теоремы построен интервальный корневой годограф. Его расположение на плоскости корней подтвердило робастную устойчивость системы при любых значениях интервальных параметров и позволило найти корневые показатели робастного качества САР (степень робастной устойчивости и степень робастной колебательности).

Проведен также анализ САР к интервальным параметрам на основе чувствительности коэффициентных показателей качества, основанных на интервальных коэффициентах характеристического полинома.

Результаты компьютерного моделирования САР скорости двигателя подтвердили выводы, полученные на основании проведенных теоретических исследований.

В работе также рассмотрены вопросы финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения, вопросы социальной ответственности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Barlett, A.C. Root location of an entire polytope of polynomials: it suffices to check the edges / A.C. Barlett, C.V. Hollot, H. Lin // *Mathematics of Controls, Signals and Systems*. – 1988. – Vol. 1. – P. 61-71.
2. Barmish, B. R. The robust root locus / B. R. Barmish, R. Tempo // *Automatica*. – 1990. – Vol. 26, № 2. – P. 283-292.
3. Ackermann, J. Stable polyhedral in parametric space. / J. Ackermann, D. Kaesbauer // *Automatica*. – 2003. – Vol. 39. – P. 937-943.
4. Rimsky, G.V. Root locus methods for robust control systems quality and stability investigations / G.V. Rimsky, A.A. Nesenchuk // *Proceedings of IFAC 13th Triennial World Congress*. – San Francisco, USA, 1996. – P. 469-474.
5. Soh, Y.C Generalized edge theorem / Y.C. Soh, Y.K. Foo // *Systems and Control Letters*. – 1989. – Vol. 12, № 3. – P. 219-224.
6. Xiao, Y. Edge test for domain stability of polytopes of two-dimensional (2-D) polynomials / Y. Xiao // *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. – Sydney, NSW, 12-15 December 2000. – Vol. 2. – P. 4215-4220.
7. Алефельд, Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер. – М.: Мир, 1987. – 356 с.
8. Вадутов, О.С. Определение границ областей локализации нулей и полюсов системы с интервальными параметрами / О.С. Вадутов, С.А. Гайворонский // *Изв. Томского политех. ун-та*. 2003. – Т.306. №1.– С.64-68.
9. Гайворонский, С.А. Анализ качества электроэнергетических систем с интервальными параметрами корневым методом/ С.А. Гайворонский, С.В. Новокшенов // VII Межд. Научно-технич. конфер. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. – Москва: МЭИ, 2001. – С. 347-348.
11. Гайворонский, С.А. Построение границ корневых областей систем с интервальными параметрами /Гайворонский С.А., Новокшенов С.В.

- //Современные техника и технологии. Тез.докл. VII междунаро. научн.-  
практич. конф. –Томск: изд. ТПУ, 2001. – С 260-263.
12. Дядик В.Ф. Теория автоматического управления: учебное пособие/ В.Ф. Дядик, С.А. Байдали, Н.С. Криницын. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 196 с.
  13. Кондратов, В.Е. Matlab как система программирования научно-технических расчетов: монография / В.Е. Кондратов, С.Б. Королев. – М.: Мир, 2002. – 350 с.
  14. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB / С.В. Поршнев. – М.: Горячая Линия–Телеком, 2003. – 592 с.
  15. Петров, Б.Н. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженерные методы анализа и синтеза / Б.Н. Петров, Н.И. Соколов, А.В. Липатов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
  16. Поляк, Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков – М.: Наука, 2002. – 303 с.
  17. Римский, Г.В. Корневые методы исследования интервальных систем / Г.В. Римский. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 186 с.
  18. Солодкин, Г.И. Пакет прикладных программ исследования и синтеза динамических систем с переменными параметрами на основе использования корневых методов /Г.И. Солодкин. – Минск: Объединенный институт проблем информатики ИАПБ, 2005. – 186 с.
  19. Удерман Э.Г. Метод корневого годографа в теории автоматического управления / Э.Г. Удерман – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 112 с.
  20. Филимонов, Н.Б. Системы многорежимного регулирования: концепция, принципы построения, проблемы синтеза / Н.Б. Филимонов // Известие вузов. Приборостроение. – 1988. – № 2. – С. 18-33.



21. Черных, И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений / И.В. Черных. – М.: Диалог–МИФИ, 2003. – 496 с.
22. Шокин, Ю. И. Интервальный анализ / Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Сибирское отделение изд-ва «Наука», 1981. – 111 с.
23. Петров Б.Н. и др. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами.
24. Панин В.Ф., Сечин А.И., Федосова В.Д. Экология для инженера://под ред. Проф. В.Ф. Панина. – М: Изд. Дом «Ноосфера», 2000. – 284с.
25. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович; Томский политехнический университет. - 3-е изд., перераб. И доп. - Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. - 178 с.
26. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно – эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы»
27. Лабораторный практикум по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» для студентов всех специальностей: учебное пособие/Амелькович Ю.А., Анищенко Ю.В., А. Н. Вторушина, М. В. Гуляев, М. Э. Гусельников, А. Г. Дашковский, Т. А. Задорожная, В. Н. Извеков, А. Г. Кагиров, К. М. Костырев, В. Ф. Панин, А. М. Плахов, С. В. Романенко. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 236с.
28. СНиП 23 – 05 – 95\* «Естественное и искусственное освещение» (с изменением N 1) [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно – технической документации.
29. ГОСТ 12.1.003-2014. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.
30. ФЗ "Об охране окружающей среды" от 10.01.2002 N 7-ФЗ [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации.

31. ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.99 М 96-ФЗ [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации.
32. В.М.Нагорный, Г.М.Федоров. Организация работы комиссии по чрезвычайным ситуациям объекта / Под ред. В.В. Шевченко. - [Электронный ресурс].
33. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования

**Приложение А**  
**(обязательное)**

Part 3

Sensitivity analysis of ACS quality indicator coefficients to interval system parameters

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8AM41	Юэ Цюцзе		

Консультант кафедры АИКС:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент каф. АИКС	Ефремов А.А.	-		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Старший пред. каф. ИЯИК	Логинова А.В.	-		

### **3 Sensitivity analysis of ACS quality indicator coefficients to interval system parameters**

#### **3.1 Study of systems with variable parameters by sensitivity theory**

Sensitivity analysis is the study of how the uncertainty in the output of a mathematical model or system (numerical or otherwise) can be apportioned to different sources of uncertainty in its inputs. A related practice is uncertainty analysis, which has a greater focus on uncertainty quantification and propagation of uncertainty. Ideally, uncertainty and sensitivity analysis should be run in tandem.

The sensitivity theory is adequately developed now. A large number of works devoted to methods of obtaining sensitivity functions and their application to multi-dimensional, nonlinear, discontinuous and impulsive systems. The theory of sensitivity enables the formulation of some control system synthesis problems if the given requirements for dynamic properties are formulated to meet the requirements of the system sensitivity. In addition, the use of information about the function sensitivity is a theoretical basis for various adaptive system development.

The currently sensitivity theory allows us to develop a unified theoretical approach to many problems solution of ACS development.

Various sensitivity assessments are used in ACS study. There is, for example, a direct assessment, defined as partial derivatives of the coordinate system or a quality control process for some parameters imposed by Bode, an indirect logarithmic evaluation of inverse Bode estimates, a semi-log sensitivity assessment, etc. However, the use of these evaluations in ACS analysis and, particularly, in synthesis encounters certain difficulties.

Firstly, it is not possible to find simple analytical relationships between sensitivity and quality indicators. Secondly, all known sensitivity assessments analyzing the small changes effect in external parameters and operating conditions on static and dynamic properties of the system, are characterized by a system of "the point." This is a serious obstacle to the system study whose parameters vary. In addition, existing synthesis methods of linear quasi-stationary systems where the sensitivities are used, and fully developed, are based on graphic design problems.

These methods, although they are for illustration only, are quite complex, especially for systems described by higher order differential equations.

Analytical methods for system synthesis using the sensitivity theory are not yet sufficiently developed, as the development of desired sensitivity characteristics faces serious difficulties.

To simplify the task of analysis and synthesis of linear systems, it is desirable to have a relatively simple and possible analytical connection between the basic system sensitivity performance (speed, oscillation, stock stability, static properties) and its parameters, not only for the stationary cases, but also for the whole change range of control process parameters.

### 3.2 ACS quality indicator coefficient

Let us consider a stationary linear continuous system with a characteristic polynomial

$$F_n(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0, \quad a_i > 0, \quad (1)$$

The coefficients are positive, which is a necessary condition for the location of all polynomial roots in the left half. We introduce the auxiliary parameters  $\lambda_i$ , that formed fours adjacent coefficients of the polynomial:

$$\lambda_i = \frac{a_{i-1} a_{i+2}}{a_i a_{i+1}}, \quad i = \overline{1, n-2}.$$

The nature of constraints imposed on parameters  $\lambda_i$  stability conditions for a low-order system is maintained for the systems of higher order. Therefore, these parameters can be called sustainability indicators  $\lambda_i$ .

We introduce some parameters of the system, "responsible" for the process in the system and performance. The same as sustainability indicators  $\lambda_i$ , these parameters are very easy to link with the transfer function coefficients of a linear system with unknown parameters. With their help, you can get some assessment of an oscillating system, which should use the set of parameters different from the set of normalized coefficients of the equation. Parameters for the characteristic polynomial (1) can be set as follows:

$$\delta_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}}, \quad i = \overline{1, n-1}.$$

It should be noted that parameters  $\delta_i$  are dimensionless and will not change the characteristic polynomial of the scale factor, i.e. as normalized coefficients; they do not characterize the system performance, but define only the shape of its temporal processes.

We write the characteristic equation of ACS motor speed with variable parameters  $K_{g1}$  and  $T_m$

$$A(s) = a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0, \quad (2)$$

$$\text{where } a_0 = 2.5K_{g1} + 1;$$

$$a_1 = 0.059K_{g1} + T_m + 0.121;$$

$$a_2 = 0.121T_m + 0.001308;$$

$$a_3 = 0.001308T_m;$$

We estimate the stability of ACS in terms of sustainability  $\lambda_1$ .

$$\lambda_1 = \frac{a_0 a_3}{a_1 a_2} = \frac{(2.5K_{g1} + 1) \cdot 0.001308T_m}{(0.059K_{g1} + T_m + 0.121) \cdot (0.121T_m + 0.001308)}$$

$K_{g1}, T_m$  are interval parameters, therefore  $\lambda_1$  is an interval indicator.

$$[\lambda_1] = [\underline{\lambda}_1; \overline{\lambda}_1] = \frac{[a_0] \cdot [a_3]}{[a_1] \cdot [a_2]} = \frac{[\underline{a}_0 \cdot \underline{a}_3; \overline{a}_0 \cdot \overline{a}_3]}{[\underline{a}_1 \cdot \underline{a}_2; \overline{a}_1 \cdot \overline{a}_2]}$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\overline{a}_0 \cdot \overline{a}_3}{\underline{a}_1 \cdot \underline{a}_2} = \frac{(2.5\overline{K}_{g1} + 1) \cdot 0.001308\overline{T}_m}{(0.059\underline{K}_{g1} + \underline{T}_m + 0.121) \cdot (0.121\underline{T}_m + 0.001308)}$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{(2.5 \cdot 3 + 1) \cdot 0.001308 \cdot 0.08}{(0.059 \cdot 2 + 0.05 + 0.121) \cdot (0.121 \cdot 0.05 + 0.001308)} = 0.418 < 0.465$$

For the stability of the system with characteristic polynomial (2), it is sufficient to satisfy the inequality  $\overline{\lambda}_1 = 0.418 < 0.465$ . Since it is executed, the system is stable for any possible changes of its interval parameters.

### 3.3 Sensitivity of ACS quality indicators in the system parameters

We introduce the concepts of sensitivity  $\lambda_i$  and  $\delta_i$  with a variable parameter  $\sigma$ :

– The sensitivity of sustainability indicators

$$S_{\sigma}^{\lambda_i} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{a_{i-1} a_{i+2}}{a_i a_{i+1}} \right), \quad i = 1, 2, \dots, m-1, m, m+1, \dots, n-2;$$

– Sensitivity indicators

$$S_{\sigma}^{\delta_i} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{a_i^2}{a_{i+1} a_{i-1}} \right), \quad i = 1, 2, \dots, m-1, m, m+1, \dots, n-3, \dots, n-1;$$

Let us find the dependence of the indicators sensitivity of ACS motor speed stability by setting  $K_{g1}$  when  $T_M = 0.078$ .

$$\lambda_1(K_{g1}) := \frac{(2.5 \cdot K_{g1} + 1) \cdot (0.001308 \cdot T_M)}{(0.059 \cdot K_{g1} + T_M + 0.121) \cdot (0.121 \cdot T_M + 0.001308)}$$

$$S\lambda_1(K_{g1}) := \frac{d}{dK_{g1}} \lambda_1(K_{g1})$$

$$S\lambda_1(K_{g1}) \text{ collect, } K_{g1} \rightarrow \frac{2.485418e6}{2.078157e6 \cdot K_{g1}^2 + 1.4018754e7 \cdot K_{g1} + 2.3641797e7}$$

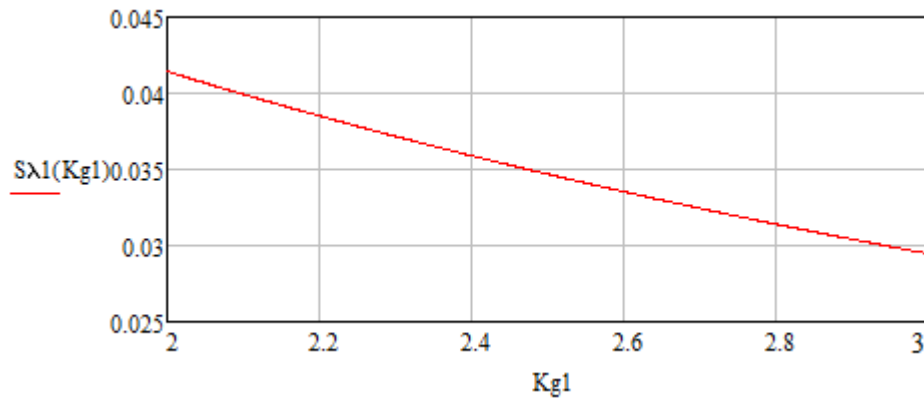


Fig. 1 – Evaluation of sensitivity indicators  $\lambda_1$  to parameter  $K_{g1}$

Sensitivity indicator  $\lambda_1$  is positive. This means that with an increase in  $K_{g1}$ , indicator  $\lambda_1$  increases, which could lead to a breach of stability sufficient conditions.

Figure 1 shows that the sensitivity value at  $K_{g1} = 3$  is less than at  $K_{g1} = 2$ .

Sensitivity indicators processes:

$$\delta_1(K_{g1}) := \frac{(0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121)^2}{(0.121 \cdot T_m + 0.001308) \cdot (2.5 \cdot K_{g1} + 1)} \quad S\delta_1(K_{g1}) := \frac{d}{dK_{g1}} \delta_1(K_{g1})$$


---


$$\delta_2(K_{g1}) := \frac{(0.121 \cdot T_m + 0.001308)^2}{(0.001308 \cdot T_m) \cdot (0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121)} \quad S\delta_2(K_{g1}) := \frac{d}{dK_{g1}} \delta_2(K_{g1})$$

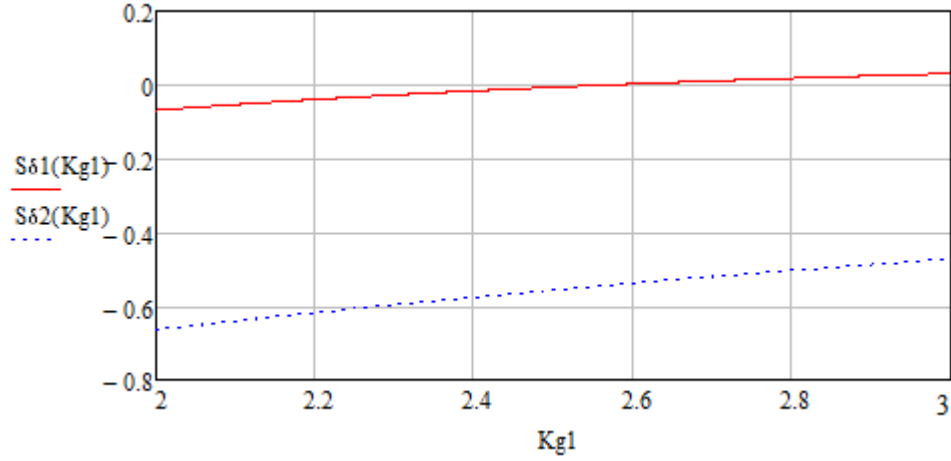


Fig. 2 – Evaluation of quality indicators of sensitivity  $\delta_1$  and  $\delta_2$  to parameter  $K_{g1}$

Sensitivity indicators form  $S_{K_{g1}}^{\delta_2}$  and the part of the indicators sensitivity form  $S_{K_{g1}}^{\delta_1}$  are negative. This means that the quality score  $\delta_1$  and  $\delta_2$  with an increase in the variable parameter  $K_{g1}$  decreases.

However, the evaluation of the sensitivity of indicators form  $S_{K_{g1}}^{\delta_1}$  is a positive part, which leads to an increase in  $\delta_1$  parameter with an increasing  $K_{g1}$  variable parameter, and as a consequence, an increase in indicator oscillatory system.



Let us find the dependence of the sensitivity of the stability indicators of ACS engine speed parameter  $T_m$  when  $K_{g1} = 2,5$ .

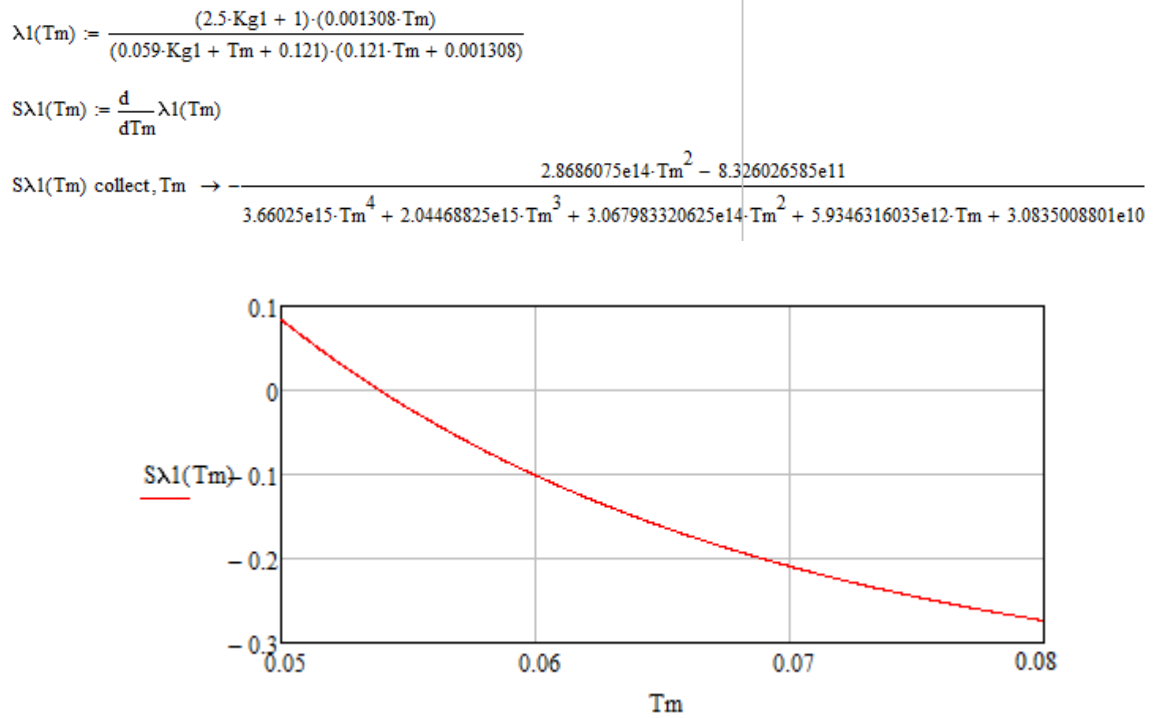


Fig. 3 – Evaluation of the quality indicators of sensitivity  $\lambda_1$  to parameter  $T_m$

The initial range  $T_m$  of the site sensitivity indicator  $\lambda_1$  is positive. This means that with an increase in  $T_m$ ,  $\lambda_1$  indicator increases, which could lead to a breach of stability sufficient conditions.

The presence of  $T_m$  with a negative sensitivity means that with an increase in  $T_m$ ,  $\lambda_1$  indicator decreases, therefore, the stability margin with indicator  $\lambda_1$  increases.

Sensitivity indicators processes:

$$\delta_1(T_m) := \frac{(0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121)^2}{(0.121 \cdot T_m + 0.001308) \cdot (2.5 \cdot K_{g1} + 1)} \quad S\delta_1(T_m) := \frac{d}{dT_m} \delta_1(T_m)$$

$$\delta_2(T_m) := \frac{(0.121 \cdot T_m + 0.001308)^2}{(0.001308 \cdot T_m) \cdot (0.059 \cdot K_{g1} + T_m + 0.121)} \quad S\delta_2(T_m) := \frac{d}{dT_m} \delta_2(T_m)$$

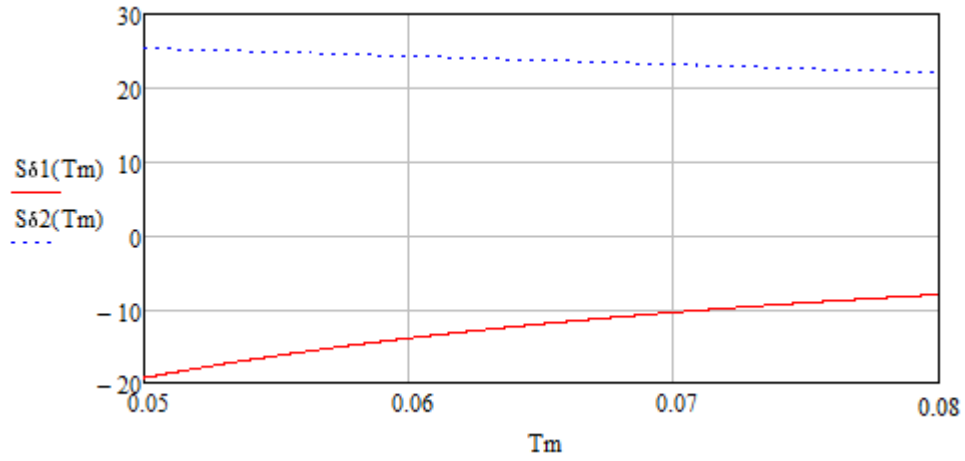


Fig. 4 – Evaluation of the quality indicators of sensitivity  $\delta_1$  and  $\delta_2$  to parameter  $T_m$

Sensitivity indicator form  $S_{T_m}^{\delta_1}$  is negative. This means that  $\delta_1$  quality indicator decreases by increasing the variable parameter  $T_m$ .

Evaluation of the sensitivity of indicators form  $S_{T_m}^{\delta_2}$  is positive, which leads to an increase in  $\delta_2$  parameter with an increasing  $T_m$  variable parameter, and as a consequence, to an increase in indicators oscillatory system.